

**AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO IM. BRONISŁAWA CZECHA
W KRAKOWIE**



**Wydział Wychowania Fizycznego i Sportu
Instytut Nauk Biomedycznych
Zakład Fizjologii i Biochemii**

Rozprawa doktorska
mgr Małgorzata Lipowska

**WPLYW TRENINGU PLYOMETRYCZNEGO NA EKONOMIĘ BIEGU
TRIATHLONISTÓW PO INTENSYWNEJ JEŹDZIE NA ROWERZE**

Promotor:

Dr hab. Łukasz Tota, prof. AWF

Kraków 2024

PODZIĘKOWANIA

Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi dr hab. Łukaszowi Tocie za opiekę naukową, zrozumienie i gotowość do znajdowania rozwiązań — gdy plan A zawodził, zawsze miał Pan Profesor gotowy plan B, C i D.

Składam serdeczne podziękowania dr Agnieszce Wojtowicz, bez której ta droga, nigdy by się nie rozpoczęła.

Składam serdeczne podziękowania dr Justynie Kuśmierczyk za nieocenioną pomoc, wsparcie i wskazówki, które były kluczowe w procesie doskonalenia mojej pracy i odkrywania nauki.

Serdeczne podziękowania dla Marii Lipowskiej, która dodawała humor i była niezastąpioną pomocą techniczną.

Składam serdeczne podziękowania dla badanych triathlonistów — życzę Wam wielu sukcesów i realizacji celów.

Składam serdeczne podziękowania moim koleżankom i kolegom z Krakowskiego Szkolnego Ośrodka Sportowego za wsparcie i motywację w pisaniu mojej pracy oraz za regularne pytania: "Kiedy obrona?"

Serdecznie podziękowania dla Piotra i Marty Bielańskiej za zapewnienie niezbędnego zabezpieczenia medycznego w okresie pandemii.

Wykaz skrótów i symboli (w kolejności alfabetycznej)

AG –	zawodnik kategorii Age-Group
%F –	procentowa zawartość tkanki tłuszczowej
AT –	próg anaerobowy
BH –	wysokość ciała
BM –	masa ciała
BMI –	wskaźnik masy ciała
FFM –	beztłuszczowa masa ciała
FM –	masa tkanki tłuszczowej
fr –	częstość oddechów
H ⁺ –	jon wodorowy
HIT –	trening o wysokiej intensywności
HR VT2 –	częstość skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego
HR max –	maksymalna częstość skurczów serca
La –	stężenie mleczanu
LIT –	trening o niskiej intensywności
PEC –	składowe sprężyste równoległe
P max [W/kg] –	moc maksymalna na kilogram masy ciała
P max –	moc maksymalna
P vt2 [W/kg] –	moc na kilogram masy ciała na poziomie drugiego progu wentylacyjnego
P vt2 –	moc na poziomie drugiego progu wentylacyjnego
RE –	ekonomia biegu
RER –	współczynnik oddechowy
RQ –	iloraz oddechowy
SCC –	cykl rozciągania – skurcz
SEC –	składowe sprężyste ciągłe
T1 –	strefa zmian między pływaniem a jazdą na rowerze
T2 –	strefa zmian między jazdą na rowerze a bieganiem
tCO ₂ –	maksymalny odsetek dwutlenku węgla w powietrzu wydychanym

VE –	wentylacja minutowa płuc
VE max –	maksymalna wentylacja minutowa płuc
VE VT2 –	minutowa wentylacja na poziomie drugiego progu wentylacyjnego
VE/VCO ₂ –	równoważnik oddechowy dla dwutlenku węgla
VE/VO ₂ –	równoważnik oddechowy dla tlenu
v max –	maksymalna prędkość biegu
VO ₂ –	minutowy pobór tlenu
VO ₂ VT2 –	pobór tlenu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego
VO ₂ /kg VT2 –	minutowy pobór tlenu na kilogram masy ciała na poziomie drugiego progu
VO ₂ max –	maksymalny minutowy pobór tlenu
v VT2 –	prędkość na poziomie drugiego progu wentylacyjnego

Spis treści

1. Wstęp	8
1.1 Triathlon	8
1.2 Obciążenia treningowe w triathlonie	10
1.2.1 Pływanie.....	13
1.2.2 Jazda na rowerze	15
1.2.3 Bieganie	18
1.3 Ekonomia biegu	22
1.4 Trening plyometryczny.....	25
2. Cel pracy i pytania badawcze	28
3. Materiał i metody	30
3.1 Ogólny schemat organizacji badań.....	30
3.2 Charakterystyka grupy badanej.....	32
3.3. Pomiary somatyczne.....	33
3.4 Metodyka badań fizjologicznych.....	33
3.4.1 Test wydolności tlenowej- test stopniowany na bieżni mechanicznej.....	33
3.4.2 Test wydolności tlenowej – test stopniowany na trenażerze rowerowym.....	34
3.4.3 Ekonomia biegu.....	35
3.4.4. Ekonomia biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze.....	36
3.5 Metodyka oznaczeń biochemicznych.....	38
3.6 Rejestracja obciążeń treningowych	39
3.7 Charakterystyka treningu plyometrycznego	39
3.8 Subiektywna ocena ciężkości pracy	41
3.9 Metody analizy statystycznej	41
4. Wyniki	43
4.1 Pomiary somatyczne.....	43
4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas testu stopniowanego na bieżni mechanicznej.....	44
4.2.1. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas biegowego testu stopniowanego.....	44
4.4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas biegowego testu stopniowanego.....	47
4.3 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas rowerowego testu stopniowanego	48
4.3.1 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas rowerowego testu stopniowanego	48
4.3.2 Wartości wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas rowerowego testu stopniowanego	50
4.4 Zmiany wskaźników fizjologicznych podczas biegu przed i po jeździe na rowerze przed interwencją treningową	51
4.4.1 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z intensywnością progową przed i po 70' jeździe na rowerze przed interwencją treningową.....	51
4.4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową przed i po 70' jeździe na rowerze przed interwencją treningową	52

4.5	Wpływ treningu plyometrycznego na ekonomię biegu	53
4.5.1	Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu na poziomie progowym	53
4.5.2	Wpływ treningu plyometrycznego na zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu w tempie startowym	54
4.5.3	Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego po jeździe na rowerze	55
4.5.4	Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową po jeździe na rowerze.....	56
4.6	Charakterystyka zrealizowanych obciążeń treningowych w okresie badań	57
5.	Dyskusja	59
5.1	Wpływ treningu plyometrycznego na zmiany wybranych wskaźników somatycznych	60
5.2	Wpływ treningu plyometrycznego na wskaźniki wydolności tlenowej	62
5.3	Zmiany wskaźników fizjologicznych podczas biegu po jeździe na rowerze	65
5.5	Wpływ treningu plyometrycznego na ekonomię biegu	67
5.6	Charakterystyka zrealizowanych obciążeń treningowych.....	71
6.	Wnioski	74
7.	Bibliografia	75
	Streszczenie	95
	Summary	98
	Wykaz tabel	101
	Wykaz rycin	102
	Aneks	103

1. Wstęp

1.1 Triathlon

Przemierzając drogę od skromnych lokalnych zawodów we Francji do światowej sceny olimpijskiej, triathlon to historia o determinacji, wytrwałości i rozwoju tej dyscypliny w globalny fenomen sportowy. Triathlon, dyscyplina o charakterze wytrzymałościowym, łączy w sobie trzy etapy: pływanie, jazdę na rowerze i bieganie, gdzie kluczowe są także strefy zmian między poszczególnymi dyscyplinami. Aby poznać historię tego sportu, cofnijmy się do lat 20. XX wieku. Wówczas we francuskiej gazecie „L'Auto” po raz pierwszy wspomniano o zawodach „Les Trois Sports” czyli „Trzy Dyscypliny”. Wyścig ten, znany jest również pod innymi nazwami, takimi jak „La Course des Débrouillards” (wyścig zaradnych) i „La Course des Touche à Tout” (wyścig wszechstronnych)¹. W 1934 roku w La Rochelle odbyły się zawody pod nazwą „Les Trois Sports”, które składały się z trzech etapów: przepłynięcia kanału (200 m), wyścigu rowerowego wokół portu La Rochelle i parku Laleu (10 km), oraz biegu (1200 m) na Stade Andre-Grill¹. Należy zaznaczyć, że idea współczesnego triathlonu pojawiła się właśnie w tamtym okresie.

Rozwój triathlonu nabrał tempa w latach 70. XX wieku, wraz z wyścigiem w Mission Bay w San Diego w 1974 roku. W zawodach tych wzięło udział 46 zawodników, a organizatorem tego wydarzenia był lokalny klub biegowy San Diego Track Club. Zawody składały się z biegu na 10 km, jazdy na rowerze na 8 km i pływania na 500 m². W tamtym czasie mało kto zdawał sobie sprawę z tego, że ta pierwsza edycja triathlonu stanie się kamieniem milowym w historii tej dyscypliny sportowej. Przełom nastąpił w 1978 roku z inauguracyjnymi zawodami Ironman na Hawajach, które zdobyły międzynarodowe uznanie². Triathlon nie tylko zyskiwał na popularności, ale również ewoluował. W 1982 roku, niezachwiana determinacja Julii Moss w dążeniu do tytułu mistrzyni świata, mimo przeciwności losu, stała się symbolem niezłomności w triathlonie³.

Kolejne lata przyniosły istotne zmiany: powstała Europejska oraz Międzynarodowa Unia Triathlonu (obecnie World Triathlon)⁴, a triathlon zwrócił uwagę świata olimpijskiego podczas Igrzysk w Los Angeles 1984 roku. To wydarzenie miało

ogromne znaczenie w historii tego sportu, sugerując, że triathlon mógłby znaleźć swoje miejsce na międzynarodowej scenie podczas najważniejszej imprezy sportowej na świecie – Igrzysk Olimpijskich. Stanowiło to istotne potwierdzenie rosnącego znaczenia triathlonu i jego coraz wyższej pozycji w światowym ruchu sportowym. W 2000 roku triathlon zadebiutował podczas Igrzysk Olimpijskich w Sydney, co było kulminacyjnym momentem uznania tej dyscypliny na arenie międzynarodowej. Triathlon wyróżnia się tym, że jest dostępny dla zawodników na każdym poziomie zaawansowania, co umożliwia uczestnikom kategorii Age-Group rywalizowanie na niektórych dystansach, obok zawodników Elity, czyli najlepszych na świecie³.

Najnowszym rozdziałem w historii triathlonu jest wprowadzenie sztafety mieszanej do programu Igrzysk Olimpijskich w Tokio 2020, co otworzyło nowe możliwości dla zawodników i dodało element widowiska na najwyższym poziomie sportowej rywalizacji. Obecnie triathlon jest niezwykle popularną dyscypliną sportu na świecie wśród zawodników na poziomie krajowym (Age-Group). Podczas Mistrzostw Świata na dystansie Ironman w roku 2019 wystartowało 2263 zawodników (IRONMAN World Championship, 2019), a w Polsce w roku 2018 licencje roczną zawodniczą AG posiadało 1131 osób, licencji dziennych sprzedano 19 285. W imprezach objętych systemem licencyjnym w Polsce odnotowano ponad 23 000 osobo-startów (Polski Związek Triathlonu, 2019).

Takim oto sposobem triathlon, od swoich skromnych początków, przekształcił się w globalny fenomen, będąc symbolem wytrzymałości, determinacji i wszechstronności^{3 4}. Mimo globalnego uznania i powszechnej popularności, triathlon jako złożona dyscyplina sportowa, wciąż pozostaje niewystarczająco zgłębnym tematem badań naukowych. Niniejsza praca doktorska koncentruje się na wypełnieniu luki w literaturze naukowej, skupiając się na analizie aspektów fizjologicznych u zawodników uprawiających triathlon.

1.2 Obciążenia treningowe w triathlonie

Skuteczny trening wytrzymałościowy obejmuje modyfikację intensywności, długości czasu trwania i częstotliwości ćwiczeń, mając na celu optymalizację wyników, minimalizację potencjalnych negatywnych skutków treningu oraz osiągnięcie szczytowej formy i rezultatów w kluczowych momentach sportowca⁵. Analizując rozkład intensywności i znacznej objętości treningowej, liczne badania przeprowadzone w różnych dyscyplinach wytrzymałościowych ukazują, że w przypadku sportowców trenujących ponad 500 godzin rocznie, 75–90% ogólnego czasu treningu wytrzymałościowego to trening o niskiej intensywności (LIT, ang. *low intensity training*). Pozostałe 10–25% obejmuje trening o wysokiej intensywności (HIT, ang. *high intensity training*)⁶. Optymalna kombinacja objętości, intensywności treningowej oraz czasu trwania treningu jest uzależniona od wymagań metabolicznych i fizjologicznych wynikających z charakterystyki danej dyscypliny i konkurencji sportowej⁵.

W triathlonie, w dyscyplinie łączącej 3 konkurencje najważniejszymi czynnikami wpływającymi na rezultat sportowy są wysokie wartości maksymalnego poboru tlenu (VO₂ max), zdolność do utrzymania jak najwyższego procentu VO₂ max przez długi czas (próg beztlenowy), wysoka krytyczna prędkość oraz niski koszt energetyczny podczas wysiłku^{7 8 9}. Ponadto, wytrzymałość jest również determinowana przez inne adaptacje fizjologiczne, takie jak funkcje układu neuromięśniowego¹⁰, wydajność metabolizmu beztlenowego¹¹ czy optymalny skład ciała¹⁰. W praktyce sportowej, zwłaszcza wśród zawodników specjalizujących się w dyscyplinach długodystansowych, takich jak triathlon, dominują programy treningowe oparte na dużej objętości treningu przy jednoczesnym zachowaniu niskiej intensywności⁵. Aby poprawić czynniki fizjologiczne i morfologiczne decydujące o wydajności w wyścigach wytrzymałościowych, sportowcy często zwiększają objętość treningu, zwłaszcza czas trwania treningu, stosując przy tym różne strategie treningowe¹². Oprócz charakterystycznej wysokiej objętości treningowej, specyficznej dla dyscyplin sportów wytrzymałościowych, konieczne jest staranne planowanie licznych sesji treningowych w ciągu tygodnia, zwłaszcza w przypadku treningu obejmującego trzy różne dyscypliny sportowe jednocześnie¹³.

Badania nad obciążeniem treningowym profesjonalnych triathlonistów oraz zawodnikami Age-Group (AG), ukazują istotne różnice w intensywności i objętości między tymi dwiema grupami. Profesjonalni triathloniści mają tendencję do realizacji planów treningów trwających ponad 20 godzin tygodniowo¹⁴, podczas gdy zawodnicy na poziomie amatorskim ćwiczą średnio około 13 godzin w tygodniu¹⁵. Analiza obciążeń treningowych w trakcie przygotowań do Igrzysk Olimpijskich ukazuje, iż zawodniczka światowej klasy zrealizowała 796 sesji treningowych w ciągu 50 tygodni, co średnio odpowiadało około 16 sesjom treningowym tygodniowo¹⁶. Obciążenie treningowe zawodników na poziomie lokalnym stanowi połowę czasu przeznaczanego na trening przez zawodników na światowym poziomie, ale jest wyższe niż objętość treningu amatorskich biegaczy maratońskich wynosząca średnio 5 godzin tygodniowo¹⁰. Badania wykazały, że 33% mężczyzn i 32% kobiet kategorii Age-Group przeznacza na trening czas przekraczający 20 godzin tygodniowo, co jest porównywalne do ilości treningu tygodniowego obserwowanej u sportowców elitarnych¹⁷. Jednak w literaturze naukowej nadal brakuje dostępnych danych dotyczących średniego tygodniowego czasu trwania treningu dla poszczególnych dyscyplin triathlonu, zwłaszcza w kontekście porównań między sportowcami przygotowującymi się do dystansów sprinterskich i olimpijskich, a zawodnikami uczestniczącymi w zawodach na długich dystansach.

Wielu autorów badało skuteczność treningu o dużej objętości w porównaniu do treningu o dużej intensywności w różnych dyscyplinach sportowych, takich jak triathlon, pływanie, kolarstwo i bieganie. Adaptacje, które przyczyniają się do poprawy osiągnięć sportowych u zawodników uprawiających dyscypliny wytrzymałościowe po treningach o dużej intensywności i mniejszej objętości, wiążą się z zwiększeniem aktywności metabolizmu mięśniowego w tym wzroście liczby i gęstości mitochondriów w włóknach mięśniowych oraz zwiększenie aktywności enzymów w tych strukturach, w porównaniu z treningiem o dużej objętości i niskiej intensywności^{11 18 19}. Dodatkowo, trening oparty na wysokiej intensywności skutkuje zwiększeniem maksymalnego poboru tlenu, poprawie ekonomii biegu, usprawnieniem działania układu sercowo-naczyniowego oraz obniżeniem stężenia mleczanu^{20 21}. W przypadku triathlonistów AG cztery tygodnie ukierunkowanego na wysoką intensywność treningu przyniosły taką samą poprawę, jak trening objętościowy, pod względem wytrzymałości, skoku w dal oraz składu ciała²². Dlatego też aktualnie w przypadku treningu wytrzymałościowego istnieje debata między zwolennikami dużych objętości treningowych a zwolennikami treningu o dużej intensywności.

W sportach o charakterze wytrzymałościowym najczęściej stosuje się dwa główne rodzaje periodyzacji: tradycyjna i odwrotna, z możliwością implementacji obu wariantów standardowego lub odwróconego²³. W ramach tradycyjnej periodyzacji, sportowiec przechodzi przez cykle obejmujące etapy przygotowawcze (podstawowe), okres przed zawodami, okres startowy (udział w zawodach) oraz okres przejściowy (poza sezonem). W przypadku uczestników zawodów wytrzymałościowych, istnieje tendencja do stosowania krótkiego okresu redukcji obciążenia przed głównym wydarzeniem, co może wpływać na optymalizację formy sportowej. Metoda odwrotna, charakteryzująca się początkowym zastosowaniem większego obciążenia, które następnie stopniowo maleje w trakcie cyklu treningowego, stanowi zaawansowaną strategię treningową zarezerwowaną głównie dla doświadczonych sportowców¹⁸. W początkowym tygodniu treningu, gdy obciążenie osiąga najwyższy poziom, stosowanie tej metody wymaga wysokiego poziomu sportowego. Po okresie regeneracyjnym sportowiec podejmuje największe obciążenie treningowe w rezultacie organizm jest lepiej wypoczęty, co ułatwia zrealizowanie większej objętości i intensywności treningu. Chociaż tradycyjna periodyzacja może być całkowicie skuteczną strategią dla triathlonistów skupiających się na dwóch lub trzech głównych wyścigach w sezonie, to głównym ograniczeniem tego podejścia jest niemożność uzyskania wielu szczytów w przypadku powtarzających się wyścigów w sezonie startowym²⁴.

1.2.1 Pływanie

Pierwszy etap zawodów triathlonowych rozpoczyna się od pokonania dystansu pływackiego, który odbywa się w akwenach otwartych. Dla najlepszych zawodników, w zależności od długości dystansu, czas potrzebny na przebycie części pływackiej wynosi od około 9 minut do 60 minut. Nietypowe warunki, takie jak brak ścian, fale, prądy wodne, trudności z nawigacją, zmienność temperatury wody a także start masowy, znacząco wpływają na trudności, z jakimi sportowcy zmagają się podczas tego etapu rywalizacji²⁵.

W tej części współzawodnictwa zezwala się na korzystanie z efektu „draftingu” czyli możliwości pływania bezpośrednio za lub obok innego zawodnika. Dodatkowo, przepisy współzawodnictwa zawodów triathlonowych regulują możliwość wykorzystywania specjalnych pianek pływackich²⁶ w zależności od temperatury wody. Pianki te mogą poprawić prędkość pływania nawet o 6%²⁷, a odpowiednie ustawienie za płynącym zawodnikiem, może zredukować opór wody do 21% oraz zmniejszyć pobór tlenu, częstość akcji serca, stężenie mleczanu we krwi, a także ocenę odczuwanego wysiłku u zawodnika²⁸. W trakcie pływania z submaksymalną intensywnością odpowiadającą 95% maksymalnej prędkości przez dystans 549 metrów z wykorzystaniem draftingu zaobserwowano $8\pm 12\%$ mniejsze zużycie tlenu, $33\pm 17\%$ niższe stężenie mleczanu oraz odczuwalnie mniejszy stopień wysiłku ($21\pm 10\%$) u zawodników. Obniżenie tych wskaźników wynikało z mniejszego oporu, szczególnie oporu pasywnego, jaki doświadczali pływacy przy maksymalnej prędkości²⁹. Ten opór okazał się być od 13 do 26% mniejszy niż dla prowadzącego pływaka³⁰. Najkorzystniejszą odległością zmniejszającą opór jest 0,5 m za prowadzącym zawodnikiem, efekt ten obserwowany jest nawet w odległości 6 m od lidera³¹. W odległości 100 i 150 cm pomiędzy płynącymi zawodnikami zaobserwowano znaczącą redukcję odpowiedzi metabolicznej wynoszącą między 8% a 31%²⁸.

Dodatkowo, warto zauważyć, że pływanie oraz jazda na rowerze stanowią istotny czynnik wpływający na wydajność podczas etapu biegowego³². Analizy pokazują, że kontrolowanie tempa pływania podczas zawodów na dystansie sprinterskim oraz olimpijskim w triathlonie, zwiększają szanse na utrzymanie się zawodnika w pierwszej grupie wyścigu podczas jazdy na rowerze i zachowania energii na ostatni etap wyścigu jakim jest bieg³³.

Podczas etapu pływackiego na dystansie olimpijskim u zawodników Age-Group średnie tętno podczas etapu pływackiego wynosiło 89,8% HR max³⁴, u zawodników Elity odnotowano średnie wartości tętna w zakresie między 91% a 92% HR max^{35 60}. Warto zauważyć, że podczas pływania na dystansie Ironman (3,8 km) zaobserwowano podobny poziom względnego tętna maksymalnego, wynoszący 91,5% HR max³⁶.

W ostatnich latach wyraźnie wzrosło znaczenie odcinka pływackiego w odniesieniu do ostatecznej lokaty podczas zawodów triathlonowych. Im krótszy dystans triathlonu, szczególnie u zawodników Elity, tym ważniejsze jest zajęcie wysokiej pozycji na koniec etapu pływackiego. Pozwala to na rozpoczęcie jazdy rowerem w czołowej grupie, co z kolei zwiększa szanse na osiągnięcie lepszego rezultatu podczas zakończenia wyścigu³⁷. W etapie pływackim triathlonu bez względu na dystans, istotą nie jest wyłącznie osiągnięcie najwyższej prędkości, ale osiągnięcie możliwie najwyższej pozycji przy jednoczesnym minimalizowaniu zużycia energii. Skuteczność pływania zależy od trzech istotnych czynników: umiejętności generowania znacznej siły mechanicznej do wytworzenia napędu, zdolności do minimalizowania oporu w wodzie oraz jednoczesnego ograniczania strat siły powstałych w wyniku przepychania wody³⁸. To zadanie jest bardzo trudne, ponieważ nie istnieje stały standardowy wzorzec pływania, który byłby odpowiedni dla wszystkich pływaków, a w szczególności triathlonisty, który rywalizuje w wodach otwartych.

Badania wskazują na dużo niższą efektywność pływania triathlonistów w odniesieniu do zawodników uprawiających pływanie³⁹. Podczas pływania kraulem u pływaków odnotowano niższy koszt energetyczny oraz wyższą efektywność napędową w porównaniu z triathlonistami^{40 41 42}. Badania wskazują, że aż 90% mężczyzn i 70% kobiet wygrywających w zawodach wychodzi w czołowej grupie z wody⁴³. W związku z tym zawodnicy powinni poświęcić czas na rozwijanie techniki już na wczesnym etapie rozwoju triathlonisty oraz program treningowy powinien zawierać wiele sesji treningowych z ćwiczeniami technicznymi, ale o niskich objętościach^{44 45 46}. Jeśli poprawa techniki jest głównym celem planu treningowego, trenerzy powinni skupić się na niej w pierwszych tygodniach mezocyklu, a odcinki pływackie powinny być krótkie. Natomiast, jeśli głównym celem jest rozwój wydolności pływania, trening ten może być planowany w dowolnym tygodniu mezocyklu dla triathlonistów o wysokich umiejętnościach technicznych, podczas gdy dla mniej doświadczonych pływaków nadal powinien być zaplanowany w pierwszych tygodniach mezocyklu stosując już pływanie na dłuższych odcinkach pływackich oraz

większej objętości⁴⁴. Dla zawodników doświadczonych trening ten może mieć charakter regeneracyjny. W kolejnych fazach przygotowań zaleca się zwiększanie intensywności treningu pływackiego⁴⁴.

Ponadto, w triathlonie trening pływania powinien być dostosowany do specyfiki danego dystansu. Na krótkich dystansach triathlonowych, dominuje konieczność osiągnięcia większej mocy i prędkości, natomiast w przypadku dłuższych dystansów wymagana jest większa wytrzymałość i zastosowanie odpowiedniej strategii tempa⁴⁷. Należy również zwrócić uwagę na takie umiejętności pływackie jak efektywny start wśród dużej ilości zawodników, umożliwiający osiągnięcie i utrzymanie wysokiego tempa na czele stawki wraz z nawigacją i draftingiem przy minimalnym zużyciu energii⁴⁸.

1.2.2 Jazda na rowerze

Kolejnym etapem w trakcie rywalizacji triathlonowej jest strefa zmian T1, która pełni rolę przejścia między pływaniem a jazdą na rowerze. Ta część stanowi wyzwanie dla zawodników ze względu na przejście z pozycji poziomej ciała w pływaniu do pozycji pionowej ciała w trakcie strefy zmian i jazdy na rowerze⁴⁷. Zmiana pozycji ciała podczas ćwiczeń istotnie wpływa na reakcje fizjologiczne i biomechaniczne^{49 50}.

Zawodnicy pokonują dystans rowerowy, który najczęściej obejmuje od 9 km do 180 km. W trakcie jazdy na rowerze wydatek energii oraz postęp w ruchu związane są ściśle z oddziaływaniem grawitacji i oporem czołowym powietrza⁵¹. W zależności od dystansów i kategorii przepisy startowe dopuszczają jazdę w konwencji z draftingiem lub bez. Terminem drafting określa się taktykę polegającą na jeździe w bliskiej odległości od innego zawodnika, która daje korzyści aerodynamiczne spowodowane zmniejszonym oporem⁵². Podczas jazdy rowerem z prędkością $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, zawodnik jadący za innym zawodnikiem, może zmniejszyć zużycie tlenu o maksymalnie 25%, utrzymując odległość za zawodnikiem, nie większą niż 0,5 metra⁵³. Okazuje się, że na zysk energii podczas jazdy na rowerze ma również wpływ liczba kolarzy przed zawodnikiem. Mniejszy pobór tlenu zaobserwowano w przypadku jazdy za ośmioma zawodnikami niż jednym, dwoma lub czterema zawodnikami⁵³. Badania pokazują, że drafting podczas etapu kolarskiego ma istotny wpływ na zmniejszenie wentylacji minutowej, poboru tlenu, częstości skurczów serca i stężenia mleczanu we krwi w czasie wysiłku⁵⁴. Podczas symulowanego triathlonu na dystansie sprinterskim,

zaobserwowano istotne obniżenie wskaźników metabolicznych u sportowców, którzy zachowywali odległość od 0,2 do 0,5 metra za prowadzącym kolarzem przy prędkości $39,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Zaobserwowano zmniejszenie zużycia tlenu o ok. 14%, częstości skurczów serca o 7% oraz wentylacji minutowej płuc o 31% w porównaniu z jazdą bez korzystania z draftingu⁵⁵.

Strategia tempa podczas jazdy rowerem w triathlonie z dozwolonym draftingiem jest mocno uzależniona od liczby i ustawienia zawodników w grupie oraz przyjętej taktycznej pozycji zawodnika względem innych zawodników⁵⁷. W przypadku ograniczenia możliwości korzystania z draftingu, zgodnie z zasadami rywalizacji, konieczne jest, aby sportowcy zachowywali adekwatną odległość między sobą, co wpływa zarówno na dynamikę jazdy, jak i strategię zawodników. Triathloniści zobowiązani są utrzymywać określoną odległość za kolejnym zawodnikiem, jednocześnie mając wyznaczony limit czasowy na przeprowadzenie wyprzedzenia⁵⁶. Jazda rowerem w konkurencjach bez korzystania z draftingu przypomina indywidualną jazdę na czas, charakteryzującą się stałą mocą na płaskim terenie podczas triathlonowego wyścigu⁵⁷. Zawodnicy kategorii Age-Group oraz Elity na długich dystansach etap kolarski najczęściej pokonują w formie indywidualnej jazdy na czas²⁶. Forma wyścigu z draftingiem dopuszczona jest dla zawodników Elity dla krótszych dystansów triathlonowych⁵⁶.

Ponadto częstotliwość pedałowania (kadencja) ma wpływ na reakcje metaboliczne zarówno podczas jazdy rowerem jak i w kolejnym etapie wyścigu jakim jest bieg. Ustalono, że częstotliwość pedałowania wpływa na koszt energetyczny⁵⁸. Wysoka kadencja, w zakresie 80–120 obrotów na minutę, może prowadzić do zwiększonego poboru tlenu przez zawodnika, co w konsekwencji może negatywnie wpływać na wydajność biegową. Aby ograniczyć te negatywne efekty, triathlonistom zaleca się utrzymanie kadencji w przedziale od 70 do 80 obrotów na minutę, przy jednoczesnym skupieniu się na obniżaniu mocy wyjściowej w ostatnich minutach odcinka rowerowego^{59 60}. Niemniej jednak, uznaje się, że kadencja około 90 obrotów na minutę podczas submaksymalnej jazdy na rowerze jest biomechanicznie optymalna⁶⁰. W przypadku jednak wyścigu na krótkim dystansie utrzymanie stałej kadencji i mocy wydaje się trudne ze względu na możliwość jazdy w konwencji z draftingiem, co wprowadza znaczną zmienność zarówno w mocy, jak i kadencji podczas zawodów⁶¹.

W trakcie zawodów na dystansie olimpijskim, wśród zawodników Elity, analizowano rozkład mocy podczas jazdy na rowerze. Zgodnie z badaniami, 51% mocy

generowanej przez zawodników mieści się w strefie 1 (poniżej pierwszego progu wentylacyjnego), 17% w strefie 2 (między pierwszym a drugim progiem wentylacyjnym), 15% w strefie 3 (między drugim progiem wentylacyjnym a maksymalną mocą tlenową) i 17% w strefie 4 (powyżej maksymalnej mocy tlenowej)^{62 35}. Średnie tętno i obciążenie u zawodników Elity oraz Age-Group podczas etapu rowerowego na dystansie olimpijskim wynoszą odpowiednio 90–92%^{62 35} oraz 91,1% maksymalnego tętna (HR max)³⁴ i między 60 a 64% maksymalnej mocy aerobowej (P max)^{35 62 34}. Podczas dystansu Ironman etap rowerowy (180 km·h⁻¹) przez zawodników Age-Group jest pokonywany na poziomie 80–83% HR max i 55% maksymalnej mocy aerobowej⁶³. Etap kolarski na krótszych dystansach wymaga większego zaangażowania systemów tlenowego i beztlenowego, niż wyścigi na dłuższych dystansach przy możliwie stałym obciążeniu⁶⁴.

Trening rowerowy w triathlonie, przede wszystkim, powinien być dostosowany do konkretnego dystansu wyścigu, uwzględniając specyficzne wymagania techniczne i taktyczne danej konkurencji. Strategie jazdy różnią się w zależności od możliwości korzystania z draftingu oraz charakterystyki trasy. Z analiz wynika, że zarówno kadencja, jak i zmienność mocy mają kluczowe znaczenie podczas etapu rowerowego. Optymalna kadencja powinna być ustalana indywidualnie, biorąc pod uwagę zarówno fizjologiczne, jak i biomechaniczne aspekty wysiłku. W kontekście rywalizacji na dystansach krótszych, gdzie występuje większe zaangażowanie systemów tlenowego i beztlenowego, zawodnicy powinni być przygotowani do zmiany intensywnościami wysiłku. Trening powinien obejmować zarówno długie odcinki jazdy na rowerze o stałej mocy, jak i interwały o wysokiej intensywności⁶⁵, aby przygotować zawodników do zawodów. W przypadku zawodów, gdzie drafting nie jest dozwolony oraz na dłuższych dystansach istotne jest, aby zawodnicy przygotowywali się do rozwijania możliwie największej, stałej mocy na całym dystansie rowerowym⁶⁶. Trening powinien koncentrować się na wytrzymałości oraz zdolności do utrzymania równomiernego tempa przez długi czas, co wymaga od zawodników skutecznego kontrolowania zasobami energetycznymi i adaptacją do długotrwałego wysiłku przy stałej intensywności. Plan treningowy powinien również obejmować treningi stref zmian T1, gdzie dochodzi do przejścia z pływania do jazdy na rowerze ze względu na adaptację do zmiany pozycji ciała pomiędzy etapami wyścigu triathlonowego^{49 50 47}. Trening rowerowy w triathlonie powinien być zatem dostosowany do specyfiki dystansu, z uwzględnieniem strategii draftingu, tempa, kadencji oraz wymagań

metabolicznych i biomechanicznych związanych z danym dystansem wyścigu triathlonowego.

1.2.3 Bieganie

Ostatnim etapem zawodów triathlonowych jest bieg, który stanowi zakończenie zawodów triathlonowych, poprzedzony strefą zmiany T2, gdzie uczestnicy dokonują wymiany sprzętu sportowego. Zawodnicy w zależności od dystansu mają do pokonania od 1 km do 42,195 km podczas ostatniego etapu triathlonu⁶⁷.

W grupie elitarnych triathlonistów zaobserwowano, że średnia wartość maksymalnego tętna na etapie biegowym podczas zawodów na dystansie olimpijskim wynosiła od 93% do 94%³⁵. W trakcie 10-kilometrowego biegu w ramach symulowanego triathlonu na dystansie olimpijskim, elitarni triathloniści osiągnęli kolejno 96%, 80% i 80% względnych wartości VO₂ max na początku, w trakcie i podczas końcowego etapu biegu⁶⁸. Zawodnicy Age-Group dystans ten pokonują, z intensywnością na poziomie 90,7% maksymalnego tętna³⁴.

Wyniki w triathlonie istotnie zależą od umiejętności sportowca w efektywnym przechodzeniu między poszczególnymi dyscyplinami. Triathloniści, na różnych poziomach umiejętności, często doświadczają subiektywnego odczucia braku koordynacji podczas biegu po zakończeniu etapu rowerowego⁶⁹. Badania wskazują, że uprzednia aktywność rowerowa wywiera wpływ na efektywność biegu i wiąże się z obserwowanymi zmianami we wskaźnikach nerwowo-mięśniowych⁷⁰, fizjologicznych^{71 72 73} i biomechanicznych^{74 75}. Wysokie wyniki w triathlonie w dużym stopniu zależą od umiejętności sportowca w pokonywaniu tych specyficznych zmian, które występują podczas przejścia z jazdy na rowerze do biegu.

Badania wykazały, że u dobrze wytrenowanych triathlonistów startujących na krótkich dystansach wcześniejsza jazda na rowerze ma stosunkowo niewielki wpływ na wyniki biegowe, zwłaszcza w porównaniu mniej wytrenowanych triathlonistów^{71 73 76 77}.

Pierwsze badania z lat 90. XX wieku, które obejmowały zawodników na średnim poziomie sportowym, wskazują na pogorszenie wydajności biegowej po wcześniejszej jeździe na rowerze⁷⁶. Kreider i in. przeprowadzili badanie, w którym zawodnicy na średnim poziomie sportowym wykonali symulowany wyścig triathlonowy (800 m pływania, 75 min. jazdy na rowerze, 40 min. biegu), a następnie każdy etap osobno⁷⁶. Badania wykazały, że wentylacja minutowa płuc, minutowy pobór

tlenu oraz częstość skurczów serca były większe podczas biegu na 10 km po pływaniu i jeździe na rowerze, niż podczas wykonywania izolowanego biegu. Z kolei podobne rezultaty uzyskali Guezennec i in. gdzie zawodnicy ukończyli triathlon na dystansie olimpijskim oraz 10 kilometrowy bieg w tym samym tempie jak podczas wyścigu triathlonowego⁷⁷. Jedynie stężenie mleczanu na końcu obu biegów 10 kilometrowych nie różniło się istotnie. Kolejne badania przeprowadzono w celu określenia wpływu 40 kilometrowej jazdy na rowerze na reakcje biomechaniczne i krążeniowo-oddechowe podczas odcinka biegowego triathlonu⁷³. Siedmiu triathlonistów pokonało 40 kilometrowy odcinek na rowerze z prędkością podobną jak podczas zawodów triathlonowych, a następnie bezpośrednio po jeździe na rowerze 10 kilometrowy bieg oraz 10 kilometrowy bieg kontrolny przy tej samej prędkości. Następujące zmienne były istotnie wyższe dla biegu po jeździe na rowerze niż biegu kontrolnego: minutowy pobór tlenu, wentylacja minutowa oraz równoważnik wentylacyjny dla tlenu i dwutlenku węgla. Badania przeprowadzone z udziałem zawodników Elity i zawodników na średnim poziomie sportowym, miały na celu porównanie zmian metabolicznych i biomechanicznych w zależności od poziomu zaawansowania sportowego. Zawodnicy ukończyli dwa 7 minutowe wysiłki na bieżni mechanicznej przed i po intensywnej jeździe na rowerze. W przeciwieństwie do elitarnych triathlonistów, sportowcy na poziomie amatorskim mieli znacznie wyższą wentylację minutową, częstość skurczów serca i zapotrzebowanie tlenu przez mięśnie oddechowe. Wystąpiła znacząca różnica w koszcie energetycznym między grupami podczas biegu po jeździe na rowerze, co ciekawe dla Elity wartość ta spadła, a wzrosła dla zawodników AG⁷¹. Bonacci i współautorzy⁷⁸ badali, które zmienne podczas jazdy rowerem są powiązane z ekonomią biegu u triathlonistów na poziomie lokalnym. Porównywano ekonomię biegu przed i po 45 minutowej intensywnej jeździe na rowerze wśród 18 triathlonistów. Ekonomia biegu pogorszyła się u 5 zawodników, u kolejnych 5 odnotowano poprawę, a u pozostałych 8 była na podobnym poziomie, jedynie wartość skali odczuwanego wysiłku (RPE) spośród badanych zmiennych była związana ekonomią biegu po jeździe na rowerze. Wyższe wartości RPE podczas końcowych etapów jazdy na rowerze związane były z pogorszeniem ekonomii biegu wśród zawodników AG. Skala ta stanowi prosty sposób, który triathloniści mogą wykorzystać do ustalania intensywności jazdy na rowerze, aby zoptymalizować późniejszą ekonomię biegu. Badania wśród sportowców na elitarnym międzynarodowym nie wykazały istotnych zmian w ekonomii biegu i koszcie energetycznym w czasie biegu po jeździe

na rowerze^{79 80}. Wyniki w triathlonie w dużej mierze zależą od zdolności sportowca od umiejętności przechodzenia między dyscyplinami, z których najważniejszą jest przejście z jazdy na rowerze na bieg (strefa zmian T2). Bieg często jest uznawany za kluczowy element sukcesu w triathlonie, zgodnie z wieloma badaniami, które wykazują silne korelacje między prędkością biegu a ogólną pozycją zawodnika⁸¹.

Triathlon charakteryzuje się wysiłkiem ciągłym z kilkukrotną zmianą struktury ruchu: pływanie, strefy zmian T1 z pływania na jazdę rowerem, jazda rowerem, strefy zmian T2 z jazdy rowerem na bieganie, bieg. Udział każdego segmentu w całkowitym czasie wynosi do 20% w przypadku pływania, od 50 do 60% dla jazdy na rowerze i 30–40% dla biegania³⁷. Triathlon jest sportem wymagającym równoczesnego opanowania trzech dyscyplin wytrzymałościowych – pływania, jazdy na rowerze i biegania, co stwarza wyzwanie dla koncepcji treningowej. Zawodnicy muszą nie tylko rozwijać swoje umiejętności w poszczególnych konkurencjach, ale także efektywnie integrować je w jedną spójną całość⁸². Triathloniści charakteryzują się wysokimi wartościami maksymalnego poboru tlenu (VO₂ max), który uznawany jest za predyktor osiągnięć u triathlonistów. Niemniej jednak, oprócz VO₂ max, inne czynniki takie jak próg beztlenowy i ekonomia ruchu, również odgrywają istotną rolę w determinowaniu osiągnięć sportowych w triathlonie^{7 8 83}. Dodatkowo, morfologiczne cechy zawodników, takie jak niski procent tkanki tłuszczowej i wysoka masa beztłuszczowa ciała, wydają się być istotnie skorelowane z lepszą wydajnością w tej dyscyplinie sportowej^{12 84}. Optymalizacja czasu treningowego oraz uwzględnienie taktyki stanowią kluczowe aspekty planowania treningu w triathlonie. Warto zwrócić uwagę na istotną rolę strategii żywieniowych i regeneracyjnych, które pełnią kluczową funkcję w utrzymaniu długotrwałej wydolności organizmu w trakcie trzech zróżnicowanych etapów zawodów triathlonowych⁵. Nie bez znaczenia jest także uwzględnienie zmienności wysiłku i przejścia między dyscyplinami.

Aby poprawić czynniki fizjologiczne i morfologiczne decydujące o wydajności w wyścigach wytrzymałościowych, sportowcy często zwiększają objętość treningu, zwłaszcza czas trwania treningu, stosując przy tym różne strategie treningowe¹². Najczęściej stosowanym modelem treningowym wśród nich jest piramidalny rozkład intensywności, w którym dominuje trening o dużej objętości i niskiej intensywności⁸⁵. Jednak w pewnych fazach sezonu niektórzy światowej klasy zawodnicy przyjmują tzw. spolaryzowany rozkład intensywności. Pojawiające się analizy wskazują, że u dobrze wytrenowanych i rekreacyjnych sportowców zastosowanie spolaryzowanego modelu

treningu, daje lepsze rezultaty w zakresie wytrzymałości, niż treningi oparte głównie na dużej objętości i niskiej intensywności lub na intensywnościach progowych⁸⁵.

Badania wskazują, że bieganie stanowi kluczowy etap na dystansie olimpijskim, podczas gdy na dystansie Ironmana zarówno bieganie, jak i jazda na rowerze mają zbliżony wpływ na wynik końcowy. W świetle powyższych ustaleń, zasadne wydaje się skoncentrowanie wysiłków treningowych głównie na doskonaleniu wydajności biegowej⁸¹. Sportowcy, kończący biegowy etap triathlonu, zgłaszają zróżnicowane odczucia fizyczne oraz reakcje organizmu, które wykraczają poza typowe doświadczenia podczas izolowanych biegów⁷⁸. W wielu badaniach podjęto próby^{68 71 73 74 76 79 80} scharakteryzowania zmiany fizjologicznych występujące podczas biegu pojeździe na rowerze i identyfikacji czynników wpływających na wyniki biegowe w triathlonie. Analizując wcześniejsze prace, można zauważyć, że dla dobrze wyszkolonych triathlonistów startujących na różnych dystansach, wpływ jazdy na rowerze na wyniki biegowe jest minimalny w porównaniu do mniej doświadczonych zawodników^{78 80 86}. Istnieją jednak doniesienia o negatywnym wpływie jazdy na rowerze na wyniki biegowe niektórych elitarnych triathlonistów⁸⁷. Badanie te stanowią mocny dowód na to, że wyniki biegu powinny być głównym celem przygotowań do rywalizacji na dystansie olimpijskim i należy szukać strategii, dzięki którym sportowiec oraz szkoleniowcy mogą zminimalizować zmiany fizjologiczne, nerwowo-mięśniowe i biomechaniczne związane z wcześniejszym pływaniem i jazdą na rowerze w zakresie wydajności biegu po jeździe na rowerze⁸⁶.

1.3 Ekonomia biegu

Triathlon jest sportem, w którym uczestnicy rywalizują w trzech odrębnych dyscyplinach: pływaniu, jeździe na rowerze i bieganiu. Zawody te zazwyczaj odbywają się w ściśle określonej kolejności, choć istnieją różnice w długości dystansów, na jakich przeprowadza się zawody triathlonowe, wszystkie one wymagają wysokiego poziomu wydolności tlenowej⁸⁴.

Powszechnie stosowanym wskaźnikiem wydolności tlenowej w sportach wytrzymałościowych jest maksymalne zużycie tlenu $VO_2 \max$. Wskaźnik ten jest uznawany za istotny predyktor potencjalnego sukcesu sportowców w sportach o charakterze wytrzymałościowym⁸⁸. Triathloniści mają wysokie wartości maksymalnego poboru tlenu ($VO_2 \max$)⁸⁹. Poza wysoką wartością $VO_2 \max$ na dobre wyniki w triathlonie wpływ mają również poziom progu beztlenowego oraz ekonomia biegu^{8 83 90}.

Ekonomia biegu (ang. *Running economy*, RE) odnosi się do efektywności ruchu podczas biegania, czyli zdolności oszczędzania energii przy utrzymaniu określonej prędkości. Różnice w ekonomii biegu między różnymi zawodnikami mogą sięgać ponad 30%⁹¹, co podkreśla jej znaczenie jako istotnego wskaźnika indywidualnych zdolności wytrzymałościowych. Ocena ekonomii biegu wymaga wykonywania wysiłku o stałej intensywności i czasie trwania przekraczającym 3 minuty, zazwyczaj mieszczącym się w zakresie od 3 do 15 minut. Prędkość biegu, przy której oceniana jest ekonomia biegu, jest poniżej progu wentylacyjnego lub progu mleczanowego. Powyżej tej intensywności, obserwuje się wystąpienie wolnej składowej zużycia tlenu (VO_2)⁹². Wartość ekonomii wysiłku jest powszechnie wyrażana jako iloczyn ilości zużywanego tlenu (VO_2), a masą ciała badanego. Ekonomia biegu wyrażona jest w jednostkach $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ lub może być przedstawiona jako całkowita ilość tlenu zużywanego do pokonania określonego dystansu, wyrażona w jednostkach $mL \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ ⁹³, lub jako ilość energii potrzebnej do przemieszczenia masy ciała badanego na ustalony dystans, wyrażona w jednostkach $J \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$ ⁹⁴.

W literaturze naukowej, bieg jest definiowany jako ekonomiczny w przypadku, gdy energia zużywana podczas biegu jest relatywnie niewielka w porównaniu z pokonaną odległością. Obserwuje się istotną różnicę między osobami wytrenowanymi w biegach długodystansowych a osobami niewytrenowanymi, ci pierwsi wykazują lepszą ekonomię biegu⁹⁵. Jednakże wewnątrzosobnicze zmienności w ekonomii biegu mogą

wynosić od 2% do 11%⁹⁶. Dodatkowo, różnorodne czynniki fizjologiczne oraz środowiskowe mogą wpływać na ekonomię biegu i efektywność mechaniczną, czyli ilość wykonanej pracy w stosunku do wydatku energetycznego.

Ekonomia biegania to złożona, wieloczynnikowa koncepcja, która reprezentuje sumę różnych cech metabolicznych, krążeniowo-oddechowych, biomechanicznych i nerwowo-mięśniowych podczas biegu submaksymalnego⁹⁷. W badaniach zaobserwowano, że biegacze charakteryzujący się lepszą ekonomią pochłaniają mniej tlenu w porównaniu z tymi, którzy wykazują gorszą ekonomię przy jednakowej prędkości⁹⁸. Badania sugerują, że różnice w ekonomii biegu mogą sięgać nawet 30% wśród biegaczy o zbliżonym poziomie maksymalnego poboru tlenu ($\text{VO}_2 \text{ max}$)⁹¹.

Przy ocenie ekonomii biegu poprzez pomiar zużycia tlenu (VO_2), istnieje ograniczenie, ponieważ nie uwzględnia on różnic w wykorzystaniu tlenowego i beztlenowego metabolizmu przy danej prędkości biegu. Dlatego niektóre badania wyrażają ekonomię biegu jako koszt kaloryczny w $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}$ lub $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)^{94 99 100}. Koszt energetyczny biegu mierzy ilość zużywanej energii, podczas gdy ekonomia biegu mierzy efektywność wykorzystania tej energii przez organizm. Najniższa zanotowana wartość minutowego poboru tlenu przy prędkości $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ wynosi $39,0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ u wschodnioafrykańskiego biegacza, który był w stanie przebiec 1500 m w 3:35 min, a jego $\text{VO}_2 \text{ max}$ wynosił tylko $63 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ¹⁰¹. Były rekordzista świata w półmaratonie mężczyzn (Tadese Zerisenay, 58 minut 23 sekundy; $\text{VO}_2 \text{ max} = 83,0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) charakteryzował się ekonomią biegu na poziomie $150 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ przy prędkości $19 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, co odpowiada $40,0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ przy prędkości $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ lub 48,2% względnej intensywności wysiłku¹⁰².

Istnieją genetyczne predyspozycje wpływające na ekonomię biegu¹⁰³. Jednak istnieje ograniczona liczba badań, które wiążą występowanie określonych wariantów genów z poprawą ekonomii biegu^{104 105}. Czynniki antropometryczne, metaboliczne, biochemiczne oraz techniczne mają znaczący wpływ na ekonomie biegu⁹⁷. Zróżnicowane cechy antropometryczne, takie jak wzrost, masa i budowa ciała oraz rozkład masy w poszczególnych segmentach ciała, mogą być kluczowe dla wyjaśnienia zarówno indywidualnych, jak i grupowych różnic w ekonomii biegu oraz jej potencjalnych uwarunkowań. Poza aspektami metabolicznymi, krążeniowo-oddechowymi i biomechanicznymi, istotnymi czynnikami ekonomii biegu są również cechy neuromięśniowe. Współdziałanie między układem nerwowym a mięśniami jest kluczowe dla każdego rodzaju ruchu i skutecznie przekłada się na mechanikę ruchu¹⁰⁶.

Badania wskazują, że ekonomia biegu (RE) może zmieniać się pod wpływem treningu¹⁰⁷⁻⁹⁵. Poprawa ekonomii biegu mieści się w zakresie od 2 do 8% przy zastosowaniu różnych krótkoterminowych interwencji, takich jak trening plyometryczny¹⁰⁸⁻¹⁰⁹⁻¹¹⁰, trening siłowy i oporowy¹¹¹⁻¹¹², wibracje całego ciała¹¹³⁻¹¹⁴, trening interwałowy¹¹⁵, trening wysokogórski¹¹⁶⁻¹¹⁷. Długoterminowy trening fizyczny może z kolei poprawić RE o 15%¹¹⁸. Badanie porównujące ekonomię biegu oraz mechanikę biegu między triathlonistami a biegaczami długodystansowymi, o zbliżonych wysokich wartościach wydolności tlenowej, wskazuje, że triathloniści charakteryzowali się lepszą ekonomią biegu i większym wyprostem ramion¹¹⁹. W kolejnym badaniu podjęto próbę porównania ekonomii biegu pomiędzy triathlonistami, rowerzystami, a biegaczami¹²⁰. Zaobserwowano, że biegacze osiągnęli lepszą ekonomię biegu w porównaniu z rowerzystami. Wskaźnik ekonomii biegu był również niższy u biegaczy i triathlonistów w porównaniu do rowerzystów. Nie wykazano istotnych statystycznie różnic w ekonomii biegu między triathlonistami a biegaczami. Na tej podstawie wyciągnięto wnioski, że transfer efektów treningu z biegania na jazdę na rowerze jest większy niż z jazdy na rowerze na bieganie. Dodatkowo, wartości współczynnika wymiany oddechowej (RER) u biegaczy i triathlonistów były znacznie niższe niż u rowerzystów, co sugeruje, że próba biegowa stanowiła dla kolarzy większe obciążenie, niż dla biegaczy czy triathlonistów¹²⁰.

Dotychczas badania nad ekonomią biegu i poprawą tego wskaźnika przy włączeniu treningu plyometrycznego skupiały się przede wszystkim na biegaczach, a osiągnięte wyniki interwencji treningowych były zróżnicowane¹⁰⁷. Niemniej jednak, stosunkowo niewiele uwagi poświęcono triathlonistom. Dlatego istnieje potrzeba dalszych badań nad ekonomią biegu i jej poprawą wśród triathlonistów, aby lepiej zrozumieć mechanizmy wpływające na ten wskaźnik i opracować skuteczne strategie treningowe dla trenerów oraz zawodników uprawiających triathlon.

1.4 Trening plyometryczny

W dzisiejszym dynamicznie rozwijającym się świecie sportu poszukiwania efektywnych metod treningowych, które poprawią wydajność i osiągnięcia sportowców, prowadzą do eksploracji różnorodnych strategii treningowych. Jedną z takich strategii może być trening plyometryczny, który zyskuje na popularności ze względu na swoje unikalne zalety i zdolność do doskonalenia specyficznych umiejętności sportowych.

Trening plyometryczny to specyficzna forma treningu siłowego, która coraz częściej jest wykorzystywana w sportach wytrzymałościowych^{121 122}. Ćwiczenia podczas takiego treningu opierają się na pracy mięśnia w cyklu rozciągnięcie-skurcz (SCC). Celem tego treningu jest zwiększenie zdolności mięśnia do szybkiego wyzwolania siły. Pomiędzy fazami rozciągnięcia i skurczem mięśnia mija pewien czas. Ograniczenie tego czasu i szybka zmiana kierunku ruchu na przeciwny decydują o ćwiczeniu plyometrycznym¹²³. Komponent kurczliwy mostków poprzecznych aktywny i miozyny w sarkomerze odgrywa istotną rolę w kontroli motorycznej i rozwoju siły podczas ćwiczeń plyometrycznych¹²⁴. Ruch plyometryczny wykorzystuje fizjologiczną krzywą długości-napięcia jednostki mięśniowo-ścięgnistej w celu zwiększenia zdolności włókien mięśniowych do generowania większego napięcia i tym samym wytworzenia większej siły¹²⁴. W ćwiczeniach plyometrycznych występują 3 fazy: fazy koncentryczna, faza amortyzacji, faza ekscentryczna¹²⁵.

Faza ekscentryczna – to pierwsza faza i polega na wstępnym obciążeniu grup mięśni agonistycznych. Podczas tej fazy SEC (Series Elastic Components) magazynuje energię elastyczną i pobudzane są wrzeciona mięśniowe¹²⁶. Czas od początku ruchu przeciwnego – do końca ruchu to faza ekscentryczna. Ekscentryczna faza podczas aktywności plyometrycznej rozciąga wrzeciono mięśniowe jednostki mięśniowo-ścięgnistej oraz niekurczliwe tkanki w mięśniu (składowe sprężyste ciągłe [SEC] i składowe sprężyste równoległe [PEC]). Stymulacja tych składowych mięśnia jest często określana jako odpowiedź neurofizjologiczno-biomechaniczna mięśnia¹²⁴. Badania pokazują, że odpowiednie rozciąganie mięśni w tej fazie może zwiększyć siłę i efektywność następującego skurczu mięśni¹²⁷. Faza ekscentryczna opiera się na trzech zmiennych rozciągania: wielkości rozciągania, szybkości rozciągania i czasie trwania rozciągania¹²⁸. Manipulacja, którymkolwiek z tych zmiennych ma znaczący wpływ na

ilość energii magazynowanej podczas ekscentrycznego ruchu, co z kolei wpływa na siłę i efektywność późniejszego skurczu mięśniowego¹²⁹.

Faza amortyzacji, zwana również fazą przejścia, to czas między fazą ekscentryczną a koncentryczną inaczej to czas od końca fazy ekscentrycznej do rozpoczęcia fazy koncentrycznej. Występuje opóźnienie między działaniem mięśni ekscentrycznych i koncentrycznych, podczas którego rdzeń kręgowy zaczyna przekazywać sygnały do rozciągniętej grupy mięśniowej agonistycznej. Faza amortyzacji jest również określana jako elektromechaniczne opóźnienie między skurczem ekscentrycznym a koncentrycznym, podczas którego mięsień musi przejść od przeciwdziałania sile do wywierania siły we właściwym kierunku. Przedłużająca się faza amortyzacji skutkuje mniejszą niż optymalna efektywnością neuromięśniową z powodu utraty sprężystej energii potencjalnej¹³⁰. Szybkie przejście od skurczu ekscentrycznego do koncentrycznego prowadzi do silniejszej odpowiedzi. Faza ta jest kluczowa dla efektywności ćwiczeń plyometrycznych, ponieważ im krótsza faza amortyzacji, tym bardziej efektywny i mocniejszy jest ruch plyometryczny, ponieważ magazynowana energia jest wykorzystywana efektywnie w trakcie przejścia pomiędzy fazami. Jeśli faza amortyzacji jest opóźniona, magazynowana energia tracona jest jako ciepło, odruch rozciągania nie jest aktywowany, a następująca praca koncentrycznego skurczu nie jest tak efektywna¹³¹. Jednym z głównych celów treningu plyometrycznego jest skrócenie tej fazy. W ostatniej fazie cyklu rozciąganie-skurcz (SSC), energia zgromadzona w składowych sprężystych ciągłych (SEC) podczas fazy ekscentrycznej jest efektywnie wykorzystywana do zwiększenia siły generowanej w kolejnym ruchu lub też może ulec rozproszeniu w postaci ciepła. Wykorzystanie zgromadzonej energii sprężystej przyczynia się do zwiększenia siły generowanej podczas ruchu fazy koncentrycznej, przewyższając poziom osiągnięty w przypadku izolowanego działania mięśnia koncentrycznego. W projektowaniu efektywnego programu treningu plyometrycznego należy uwzględnić następujące zmienne: intensywność, częstotliwość, objętość, odpoczynek oraz progresję¹²⁴. W treningu plyometrycznym, intensywność jest regulowana przez typ wykonywanych ćwiczeń. Ćwiczenia plyometryczne mogą przybierać różne formy i poziomy intensywności. Skoki obunóż na skrzynię stanowią ćwiczenia o mniejszej intensywności, podczas gdy skoki na jednej nodze z wysokości są bardziej intensywne. Częstotliwość to liczba sesji treningowych wykonywanych w trakcie cyklu treningowego. Zaleca się, aby biegacze przeprowadzali trening plyometryczny dwukrotnie w tygodniu¹³². W przypadku większości dyscyplin,

zauważalna poprawa wyników występuje przy programach trwających mniej niż 10 tygodni¹³². Objętość w treningu plyometrycznym zazwyczaj wyrażana jest poprzez liczbę powtórzeń i serii wykonanych podczas danej sesji treningowej. W przypadku dolnej części ciała objętość często określana jest jako liczba kontaktów stóp z podłożem. Pięćdziesiąt kontaktów z podłożem podczas jednej sesji treningowej uznawane jest za niski poziom objętości, natomiast ponad 200 kontaktów za wysoki poziom objętości. Objętość powinna być zwiększana w sposób progresywny, aby zredukować ryzyko kontuzji lub przetrenowania¹²⁴. Zaleca się 48 do 72 godzin przerwy między sesjami treningowymi z wykorzystaniem ćwiczeń plyometrycznych. Natomiast pomiędzy poszczególnymi seriami w trakcie jednej sesji zaleca się odpoczynek trwający od 2 do 5 minut¹³³. Typowym ćwiczeniem plyometrycznym jest skok po zeskoku z pewnej wysokości, tzw. *drop jump* (DJ)¹²³. Trening ten wymaga mniejszej przestrzeni, krótszego czasu i ograniczonego sprzętu do przeprowadzenia treningowych sesji. Trening plyometryczny, poprawia zdolność do lepszego magazynowania i wykorzystywania energii sprężystej, co prowadzi do zmniejszenia zużycia energii podczas biegania¹³⁴. Zatem trening plyometryczny może okazać się skuteczną metodą poprawy ekonomii biegu oraz wyników u triathlonistów.

2. Cel pracy i pytania badawcze

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu 8-tygodniowego treningu plyometrycznego u triathlonistów na ekonomię biegu po intensywnej jeździe na rowerze.

Praca miała również na celu ocenę wpływu treningu o charakterze plyometrycznym na zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych na wysiłek o charakterze progowym (VT2) i maksymalnym (max) zarówno podczas biegu jak i jazdy na rowerze.

Pytania badawcze:

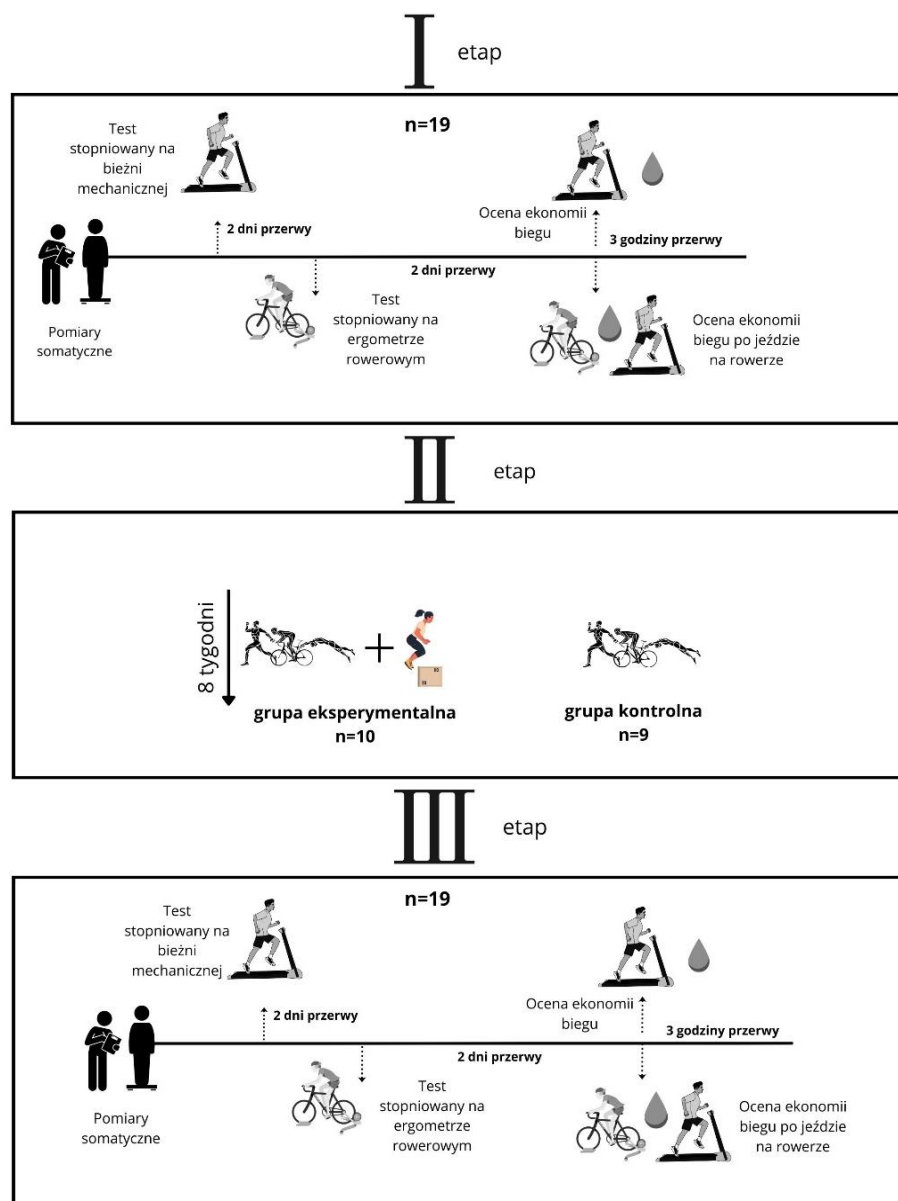
1. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wskaźniki fizjologiczne charakteryzujące poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas testu stopniowanego na bieżni mechanicznej u triathlonistów?
2. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wskaźniki fizjologiczne charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas testu stopniowanego na bieżni mechanicznej?
3. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wskaźniki fizjologiczne charakteryzujące poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas testu stopniowanego na ergometrze rowerowym u triathlonistów?
4. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wskaźniki fizjologiczne charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas testu stopniowanego na ergometrze rowerowym u triathlonistów?
5. Czy występuje różnica w ekonomii biegu z intensywnością charakterystyczną dla drugiego progu wentylacyjnego VT2 przed i po intensywnej jeździe na rowerze u triathlonistów?
6. Czy występuje różnica w ekonomii biegu z prędkością startową przed i po intensywnej jeździe na rowerze u triathlonistów?
7. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na ekonomię biegu z intensywnością charakterystyczną dla drugiego progu wentylacyjnego VT2?
8. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z intensywnością charakterystyczną dla drugiego progu wentylacyjnego VT2?

9. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na ekonomię biegu podczas biegu z prędkością startową?
10. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową?
11. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na ekonomię biegu z intensywnością charakterystyczną dla drugiego progu wentylacyjnego VT2 po jeździe na rowerze?
12. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z intensywnością charakterystyczną dla drugiego progu wentylacyjnego VT2 po jeździe na rowerze?
13. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na ekonomię biegu podczas biegu z prędkością startową po jeździe na rowerze?
14. Czy 8 tygodniowy trening plyometryczny wpływa na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową po jeździe na rowerze?

3. Materiał i metody

3.1 Ogólny schemat organizacji badań

Badania miały charakter eksperymentalny i zostały przeprowadzone z udziałem zawodników trenujących triathlon (Age-Group, AG). Ogólny schemat organizacji badań przedstawiono na rycinie 1.



Rycina 1. Schemat organizacyjny badania

W ramach badań wykonano pomiary somatyczne, fizjologiczne i biochemiczne. Do badania zostało zrekrutowanych 26 zawodników. Z powodu kontuzji, a także trwającej pandemii koronawirusa SARS-CoV-2 (COVID-19) i związanych z tym przypadków zakażeń wśród badanych, pełny komplet wyników został uzyskany od 19 zawodników.

Badanie zostało podzielone na trzy kluczowe etapy, które zaznaczono na rycinie 1. Pierwszy etap obejmował pomiary somatyczne oraz zestaw testów wysiłkowych wraz z oznaczeniami biochemicznymi. W ramach tych testów wykonano: test stopniowany na bieżni mechanicznej, test stopniowany na cykloergometrze, test oceniający ekonomię biegu oraz test oceniający ekonomię biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze. Wszystkie wymienione testy zostały przeprowadzone z zachowaniem odpowiednich przerw wypoczynkowych. Między kolejnymi testami stopniowanymi (bieg, rower) upłynęło 2 dni, a także zachowano dwudniową przerwę między ostatnim testem stopniowanym, a testami oceniającymi ekonomię biegu. Ocena ekonomii biegu oraz ocena ekonomii biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze odbywała się tego samego dnia. Pomiedzy tymi testami wysiłkowymi zachowana była 180 minutowa przerwa, podczas której zawodnicy spożywali standardowy posiłek około wysiłkowy.

W drugim etapie badań zawodnicy zostali przydzieleni losowo (randomizacja) do dwóch grup: kontrolnej i eksperymentalnej. Badani z grupy eksperymentalnej włączyli dodatkowo do swojego planu treningowego trening plyometryczny, który trwał przez 8 tygodni (2 razy w tygodniu). W tym samym czasie, uczestnicy z grupy kontrolnej kontynuowali swoje dotychczasowe treningi. Trening plyometryczny (Tabela 1) odbywał się pod stałą kontrolą badającego na hali sportowej.

Po upływie 8 tygodni, w ostatnim trzecim etapie badania przeprowadzono ponownie pomiary somatyczne oraz zestaw testów wysiłkowych z części pierwszej prowadzonych badań: test stopniowany na bieżni mechanicznej, test stopniowany na cykloergometrze, test oceniający ekonomię biegu, test oceniający ekonomię biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze. Wszystkie próby wysiłkowe zostały przeprowadzone zgodnie z procedurami z części pierwszej badania.

W trakcie 8 tygodni prowadzono rejestrację obciążeń treningowych u wszystkich zawodników. Uczestnikom przekazano informacje o konieczności zachowania dotychczasowych nawyków żywieniowych 2 tygodnie przed oraz w trakcie trwania badań.

Każdy zawodnik udzielił świadomej pisemnej zgody na udział w badaniu. Procedura eksperymentalna była zgodna z wytycznymi Deklaracji Helsińskiej i została zatwierdzona przez Komisję Bioetyczną przy Okręgowej Izbie Lekarskiej w Krakowie Nr 221/KBL/OIL/2021 z dnia 16 lipca 2021. Zawodnicy posiadali aktualne badania sportowe, co było jednym z kryteriów włączenia do badań. Badani zostali poinformowani o celu badań, zastosowanej metodyce oraz możliwym ryzyku i o możliwość rezygnacji na dowolnym etapie prowadzonego eksperymentu. Badania zostały przeprowadzone w certyfikowanym Centralnym Laboratorium Naukowo-Badawczym Akademii Wychowania Fizycznego w Krakowie (PN-EN ISO 9001:2015)

3.2 Charakterystyka grupy badanej

Grupę badanych stanowiło 19 zawodników AG trenujących triathlon. Zawodnicy AG to zawodnicy konkurujący w pięcioletnich kategoriach wiekowych, nie mogący rywalizować z zawodnikami Elity posiadającymi licencję World Triathlon (dawniej International Triathlon Union).

Średnia wieku badanych wynosiła 35,6 ($\pm 2,8$) lat, a średni staż treningowy 9,5 ($\pm 3,3$) lat. Wszyscy uczestnicy posiadali najlepszy czas pokonania dystansu olimpijskiego (1,5 km-40 km-10 km) poniżej 2,5 h. Badani zawodnicy to reprezentanci kraju podczas Mistrzostw Europy AG w Triathlonie w 2022 roku na dystansie standard oraz zajmujący czołowe miejsca w swojej kategorii wiekowej podczas lokalnych zawodów triathlonowych na dystansach sprint oraz standard.

Zawodnicy, w ciągu dwóch lat poprzedzających udział w badaniach, nie mieli doświadczenia związanego z treningiem plyometrycznym. W trakcie realizacji badania, sportowcy znajdowali się w początkowej fazie przygotowawczej poza sezonem startowym. Kryteria włączenia do badań:

- płeć męska,
- wiek między 30 a 40 lat,
- aktualne badania sportowo lekarskie,
- czynni zawodnicy trenujący triathlon,
- staż treningowy wynoszący minimum 5 lat,

- brak realizacji treningu plyometrycznego w planie treningowym w okresie 2 latach, poprzedzających udział w badaniach.

3.3. Pomiary somatyczne

Masę ciała (BM) zmierzono przy użyciu wagi Tanita (BC-545, Japonia). Do oceny struktury ciała zastosowano technikę bioimpedancji elektrycznej wykorzystując czteroelektrodowy analizator składu ciała BIA AKERN 101, za pomocą którego wyznaczono:

- masę tkanki tłuszczowej (*ang. Fat Mas*, FM),
- beztłuszczową masę ciała (*ang. Fat-free mass*, FFM),
- procentową zawartość tkanki tłuszczowej (*ang. fat*, %F),

oraz wyliczono:

- wskaźnik masy ciała (*ang. Body Mass Index*, BMI)¹³⁵.

Wysokość ciała (*ang. Body height*, BH) określono wykorzystując antropometr typu Martin (USA) z dokładnością pomiaru do 1 mm.

Pomiar przeprowadzono w godzinach przedpołudniowych. Przed pomiarem, uczestnicy zostali poinstruowani, aby dzień wcześniej unikali wysiłków, które mogłyby spowodować odwodnienie organizmu. Zalecono im również, aby nie korzystali z sauny i dbali o prawidłowe nawodnienie organizmu przed przystąpieniem do pomiarów.

3.4 Metodyka badań fizjologicznych

3.4.1 Test wydolności tlenowej – test stopniowany na bieżni mechanicznej

Test wysiłkowy o stopniowo wzrastającej intensywności na bieżni mechanicznej (Saturn 250/100R firmy h/p/Cosmos – produkcji niemieckiej) wykonywano do subiektywnego odczucia niemożności kontynuowania wysiłku „do odmowy”. Badanie rozpoczęto od 2-minutowego okresu rejestracji spoczynkowych wskaźników krążeniowo-oddechowych w pozycji stojącej na bieżni mechanicznej. Kolejnym etapem była 4-minutowa rozgrzewka przy prędkości 8 km·h⁻¹. Następnie co 2 minuty, prędkość

została zwiększana o $1,1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, przy stałym kącie nachylenia bieżni 1° . Próba wykonywana była, aż do momentu odmowy przez zawodnika kontynuowania dalszej pracy spowodowanej skrajnym zmęczeniem. Na podstawie zmian wskaźników krążeniowo-oddechowych podczas testu stopniowanego zostało wyznaczone $\text{VO}_2 \text{ max}$ oraz drugi próg wentylacji (VT_2):

Kryteria określenia $\text{VO}_2 \text{ max}$ ¹³⁶:

- brak przyrostu zużycia tlenu pomimo wzrostu obciążenia -plateau VO_2 ,
- współczynnik wymiany oddechowej RER wyniesie co najmniej 1,10,
- maksymalna częstość skurczów będzie zbliżona do maksymalnego,
- stężenie mleczanu po zakończonym teście powyżej $8\text{--}9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,

Kryteria określenia VT_2 na podstawie analizy wydychanych gazów¹³⁷:

- maksymalny odsetek dwutlenku węgla w powietrzu wydychanym ($t\text{CO}_2$),
- minimalną wartość równoważnika oddechowego dla CO_2 ($\text{VE}\cdot\text{VCO}_2^{-1}$),
- gwałtowny, nieliniowy wzrost wentylacji płuc (VE).

Podczas testu stopniowanego na bieżni mechanicznej w sposób ciągły za pomocą ergospirometru (Cortex MetaLyzer R3) rejestrowano następujące parametry: minutowy pobór tlenu (VO_2 , VO_2/kg), wentylacja minutowa płuc (VE), minutowe wydalenie dwutlenku węgla (VCO_2), częstość oddechów (FR), objętość oddechowa (VT), frakcja tlenu i dwutlenek węgla w powietrzu wydychanym (FEO_2 , FECO_2), iloraz oddechowy (RQ), ekwiwalent oddechowy dla tlenu i dwutlenku węgla ($\text{VE}\cdot\text{O}_2^{-1}$, $\text{VE}\cdot\text{VCO}_2^{-1}$), częstość skurczów serca (HR).

3.4.2 Test wydolności tlenowej – test stopniowany na trenerze rowerowym

Test wysiłkowy przeprowadzono na ergometrze rowerowym (Cyclus 2) przy użyciu własnych rowerów szosowych wyposażonych w zatraskowy system pedałów. Test na ergometrze kolarskim rozpoczął się od 2-minutowego okresu rejestracji spoczynkowych wskaźników krążeniowo-oddechowych w pozycji siedzącej na rowerze. Kolejnym etapem była 4-minutowa rozgrzewka przy obciążeniu 90 W. Następnie co 2 minuty, obciążenie było zwiększane o 30 W, aż uczestnicy nie byli w stanie utrzymać stabilnego rytmu tj. 60 -70 obr/min. Częstość skurczów serca w trakcie próby wysiłkowej mierzono za pomocą urządzenia typu „Polar S 610 i”

produkcji fińskiej. Test wysiłkowy o stopniowo wzrastającej intensywności wykonywano do subiektywnego odczucia niemożności kontynuowania wysiłku „do odmowy”. Na podstawie zmian wskaźników krążeniowo-oddechowych podczas testu stopniowanego zostało wyznaczone $VO_2 \max$ oraz drugi próg wentylacji (VT2).

Kryteria określenia $VO_2 \max$ ¹³⁶:

- brak przyrostu zużycia tlenu pomimo wzrostu obciążenia -plateau VO_2 ,
- współczynnik wymiany oddechowej RER wyniesie co najmniej 1,10,
- maksymalna częstość skurczów będzie zbliżona do maksymalnego,
- stężenie mleczanu po zakończonym teście powyżej 8-9 mmol·L⁻¹.

Kryteria określenia VT2 na podstawie analizy wydychanych gazów¹³⁷:

- maksymalny odsetek dwutlenku węgla w powietrzu wydychanym (tCO_2),
- minimalną wartość równoważnika oddechowego dla CO_2 ($VE \cdot VCO_2^{-1}$),
- gwałtowny, nieliniowy wzrost wentylacji płuc (VE).

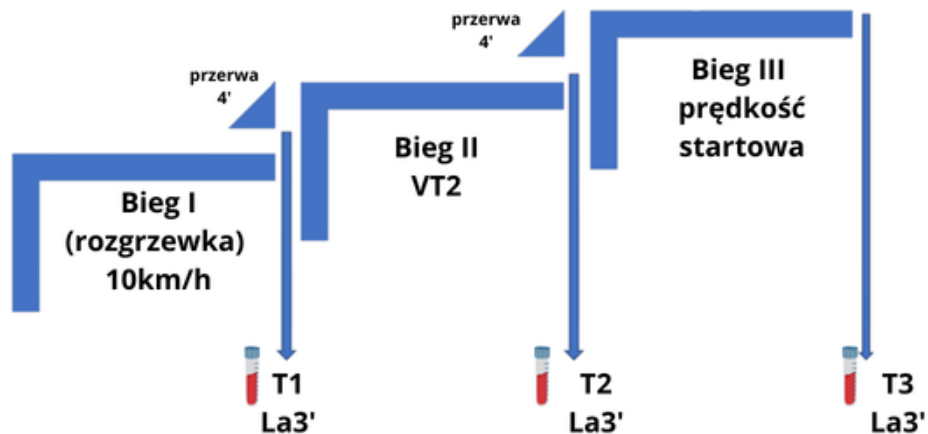
Podczas testu stopniowanego w sposób ciągły za pomocą ergospirometru (Cortex MetaLyzar R3) rejestrowano następujące parametry: minutowy pobór tlenu (VO_2 , VO_2/kg), wentylacja minutowa płuc (VE), minutowe wydalanie dwutlenku węgla (VCO_2), częstość oddechów (FR), objętość oddechowa (VT), frakcja tlenu i dwutlenek węgla w powietrzu wydychanym (FEO_2 , $FECO_2$), iloraz oddechowy (RQ), ekwiwalent oddechowy dla tlenu i dwutlenku węgla ($VE \cdot O_2^{-1}$, $VE \cdot VCO_2^{-1}$), częstość skurczów serca (HR).

Na podstawie zmian wskaźników krążeniowo-oddechowych podczas testu stopniowanego zostało wyznaczone $VO_2 \max$ oraz drugi próg wentylacji (VT2).

3.4.3 Ekonomia biegu

Przed przystąpieniem do badań wysiłkowych dokonano pomiaru masy ciała (BM), z dokładnością do 0,1 kg. Do oceny ekonomii biegu badani wykonali test na bieżni mechanicznej (Saturn 250/100R firmy h/p/Cosmos – produkcji niemieckiej) składający się z trzech 6-minutowych wysiłków oddzielonych 4-minutowymi przerwami wypoczynkowymi (rycina. 3). Test został wykonany przy nachyleniu bieżni wynoszącym 1°. Intensywność wysiłku została dostosowana indywidualnie dla każdego zawodnika, na podstawie biegowego testu stopniowanego:

- **I wysiłek** stanowił rozgrzewkę przy prędkości $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.
- **II wysiłek** z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2.
- **III wysiłek z prędkością startową** wyliczoną dla każdego zawodnika na podstawie średniego tempa biegu osiąganego podczas zawodów triathlonowych (dystans olimpijski) na dystansie 10 km w poprzedzającym okresie/ sezonie startowym.



Rycina 2. Schemat oceny ekonomii biegu

Przed wysiłkiem oraz w każdej trzeciej minucie przerwy po wysiłku wykonano oznaczenie stężenia mleczanu we krwi badanych. Wysiłek biegowy wykonano na bieżni mechanicznej model Saturn 250/100R, wyprodukowanej przez niemieckiego producenta h/p/Cosmos. Ekonomia biegu została obliczona jako zużycie tlenu potrzebnego do pokonania 1 km przy danej prędkości i wyrażona w $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ⁹³.

3.4.4. Ekonomia biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze

Przed testem wykonywano rozgrzewkę na cykloergometrze trwającą 6 minut, podczas której uczestnicy utrzymywali intensywność na poziomie 50% $\text{VO}_2 \text{ max}$ przy kadencji 80 a 90 obr/min. Intensywność każdego wysiłku została dobrana indywidualnie dla każdego zawodnika na podstawie rowerowego testu stopniowanego.

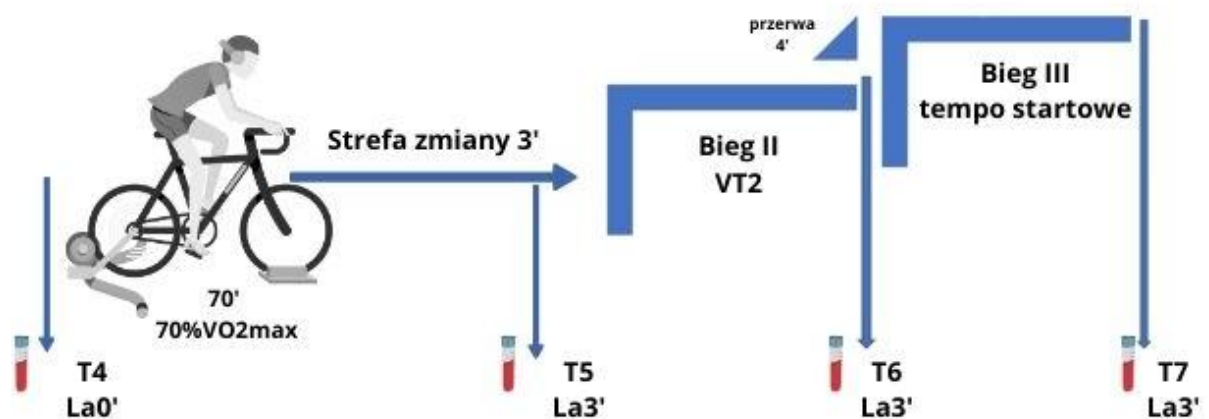
Ocena ekonomii biegu została poprzedzona 70 minutowym wysiłkiem na ergometrze rowerowym przy intensywności 70% $\text{VO}_2 \text{ max}$ oraz kadencji między 80 a 90 obr/min. Intensywność wysiłku była dobrana indywidualnie dla każdego zawodnika na podstawie rowerowego testu stopniowanego. Przyjęty czas trwania oraz

stałe obciążenie wysiłku na ergometrze odzwierciedlały warunki, wyścigów triathlonowych na dystansie olimpijskim wśród zawodników AG, gdzie zawodnicy rywalizują w konwencji bez-draftingu⁵⁷.

Bezpośrednio po zakończeniu jazdy na rowerze, zgodnie z praktyką stosowaną podczas zawodów triathlonowych, badani przeprowadzili zmianę obuwia kolarskiego na buty przeznaczone do biegu. Następnie wykonali dwa 6-minutowe wysiłki na bieżni mechanicznej oddzielone 4-minutowymi przerwami wypoczynkowymi przy takich samych prędkościach jak ocena ekonomii biegu przed jazdą na rowerze (rycina 2). Pierwszy wysiłek odbywał się z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2, a drugi wysiłek został dostosowany dla każdego zawodnika na podstawie średniego tempa biegu osiąganego podczas zawodów triathlonowych (dystans olimpijski) na dystansie 10 km w poprzedzającym sezonie startowym.

Oznaczenia stężenia mleczanu zostały wykonane przed jazdą na rowerze, po jeździe na rowerze oraz w każdej trzeciej minucie przerwy po wysiłku na bieżni mechanicznej (rycina 3).

Wysiłek kolarski wykonywany był na ergometrze Cyclus 2 z możliwością regulacji obciążenia z użyciem roweru. Badani korzystali z własnych rowerów wraz z specjalnymi zatrzaskowymi pedałami. Wysiłek biegowy wykonywany był na bieżni mechanicznej Saturn 250/100R firmy h/p/Cosmos (produkcji niemieckiej).



Rycina 3. Schemat oceny ekonomii biegu po jeździe na rowerze

3.5 Metodyka oznaczeń biochemicznych

W trakcie testów wysiłkowych oceniających ekonomię biegu oraz ekonomię biegu bezpośrednio po jeździe na rowerze przeprowadzono oznaczenia stężenia mleczanu we krwi badanych. Pomiary te przeprowadzono w następujących punktach czasowych (rycina 3 oraz rycina 4):

- T1- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
- T2- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2,
- T3- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej tempu startowemu na 10 km
- T4- po upływie 180 minut od ostatniego wysiłku na bieżni mechanicznej, przed rozpoczęciem jazdy na ergometrze rowerowym,
- T5- w 3 minucie po zakończeniu 70-minutowej jazdy na ergometrze rowerowym,
- T6- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2,
- T7- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej tempu startowemu na 10 km

Próbki krwi arterializowanej (włośniczkowej) pobierano z opuszka palca uczestników badania, a oznaczenia stężenia mleczanu (La-) przeprowadzono za pomocą analizatora biochemicznego fotometru Dr. Lange Plus LP20 z wykorzystaniem odczynnika LKM 140 – Lactate (Dr Lange & Co GmbH, Niemcy)



Rycina 4. Schemat pobrań krwi do oznaczeń biochemicznych

3.6 Rejestracja obciążeń treningowych

Rejestrację obciążeń treningowych wykonano na podstawie prowadzonego przez zawodników dziennika treningowego. Intensywność każdego treningu była monitorowana za pomocą indywidualnych pulsometrów zawodników firm Polar oraz Garmin. Na podstawie wyników pierwszego testu stopniowego na bieżni mechanicznej oraz ergometrze rowerowym wyznaczano trzy strefy intensywności dla zawodników w odniesieniu do częstości skurczów serca na minutę: poniżej drugiego progu wentylacyjnego (strefa podprogowa), powyżej tego progu (strefa nadprogowa), oraz strefa okołoprogową ($HRVT2 \pm 3 \text{ sk.min}^{-1}$). Strefy intensywności zostały wyznaczone dla każdej dyscypliny oddzielnie. Analizę obciążeń treningowych w treningu pływackim przeprowadzono, korzystając z danych zebranych za pomocą aplikacji dostępnych dla zegarków sportowych, które były używane przez uczestników badania. Szczegółową charakterystykę zrealizowanego treningu w ciągu 8 tygodni trwania projektu przedstawiono w tabeli 2.

3.7 Charakterystyka treningu plyometrycznego

Uczestnicy przydzieleni do grupy eksperymentalnej wykonywali dwa dodatkowe treningi w tygodniu o charakterze plyometrycznym przez okres 8 tygodni. Zawodnicy w grupie kontrolnej trenowali jak dotychczas według swoich planów treningowych. Wszystkie sesje treningowe odbywały się w kontrolowanych warunkach na specjalnie przystosowanej do tego sali gimnastycznej. Podczas tych sesji obecny był wykwalifikowany trener, który nadzorował przebieg treningów oraz dbał o prawidłową technikę wykonywanych ćwiczeń. Struktura każdej sesji treningowej składała się z trzech etapów:

1. Rozgrzewki trwającej 15 minut, służącej przygotowaniu uczestników do intensywnego wysiłku.
2. Części głównej treningu trwającej 30-40 minut, w trakcie której uczestnicy wykonywali ćwiczenia plyometryczne.
3. 10-minutowy okres rozciągania statycznego.

Sesje treningowe odbywały się regularnie, w każdy poniedziałek oraz środę przez okres 8 tygodni. Ponadto, uczestnicy zostali poinformowani o konieczności unikania wykonywania intensywnych sesji treningowych w dniach bezpośrednio poprzedzających i następujących po sesjach plyometrycznych. Objętość treningowa podlegała stopniowemu zwiększaniu w ciągu ośmiu tygodni i była monitorowana poprzez pomiar liczby kontaktów stóp z podłożem podczas sesji treningowej. Szczegółowe dane dotyczące interwencji treningowej zostały zebrane i przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Plan autorskiego treningu

Ćwiczenie	Tydzień	Przerwa [min]	Powtórzenia w tygodniu			
			1	2	3	4
Squat jump		2	2x6	2x8	2x10	2x10
Wykroki z wyskokiem		2	2x6	2x8	2x10	2x10
Skoki na jednej na nodze w przód		1	2x5/5	2x6/6	2x7/7	2x8/8
Boczne przeskoki obunóż	1-4	2	2x6	2x8	2x10	2x10
Zeskok z podwyższenia-wyskok		2	2x5	2x6	2x7	2x8
Kontakt stóp z podłożem			56	72	88	92
			5	6	7	8
Przeskoki obunóż nad płótkami		2	2x8	2x10	2x10	3x8
Skoki w górę z miejsca (CMJ)		2	2x8	2x10	3x8	3x8
Skoki na jednej nodze w przód		1	2x10/10	2x10/10	2x10/10	3x8/8
Zeskok z podwyższenia, odbicie, naskok na niższą skrzynię	5-8	2	2x5	2x6	2x7	2x8
Wieloskok		2	2x8	2x10	2x10	3x8
Zeskok w głąb obunóż		2	2x6	2x6	2x8	2x8
Kontakt stóp z podłożem			90	104	118	128

3.8 Subiektywna ocena ciężkości pracy

Subiektywne odczucie ciężkości wysiłku badanych mężczyzn określono po ukończeniu każdego 6 minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej oceniającego ekonomie biegu za pomocą 15-stopniowej skali Borga (RPE) – skala punktowa od 6 do 20 punktów¹³⁸.

3.9 Metody analizy statystycznej

Analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu arkusza kalkulacyjnego w programie Microsoft Office (Excel 2016) oraz oprogramowania Statistica 13.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA). Dane zostały przedstawione w postaci średnia (\bar{x}) ± odchylenie standardowe (SD). Weryfikacja normalności rozkładów została przeprowadzona za pomocą testu Shapiro-Wilk'a. W przypadku porównania jedynie dwóch grup i zachowania rozkładu normalnego, użyto testu t-Studenta, w przeciwnym wypadku testu nieparametrycznego U-Manna-Whitneya. W przypadku analizy porównującej dane uzyskane w czasie pierwszego i drugiego testu sprawdzono założenie jednorodności wariancji przy użyciu testu Levena, a ponieważ nie zaobserwowano zaburzeń jednorodności przeprowadzono analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami (czynniki: grupa i powtórzenie testu).

1. W celu sprawdzenia czy występowały różnice w obciążeniach treningowych między grupą eksperymentalną a kontrolną, przeprowadzono nieparametryczne porównanie z wykorzystaniem testu U-Manna Whitneya-
2. Poziomy wskaźników somatycznych w obu grupach porównano przed i po okresie treningowym przy użyciu testu t dla prób zależnych.
3. Analizę zmian wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z intensywnością charakterystyczną dla VT2 oraz biegu z prędkością startową przed i po 70-minutowej jeździe na rowerze przeprowadzono przy użyciu testu t-Studenta.
4. W celu oceny efektów interwencji treningowej zastosowano analizę z powtarzanymi pomiarami ANOVA, uwzględniając czynnik grupy (dodatkowy trening ply vs. trening oraz powtórzenie pomiaru po interwencji treningowej).

W analizie wyników uwzględniono poprawkę Bonferroniego, dla prób zależnych. Za graniczny poziom istotności statystycznej alfa przyjęto 0,05 dla wszystkich analiz. W przypadku wykrycia istotnego ($p < 0,05$) efektu głównego czynnika w ANOVA, przeprowadzono analizę post-hoc stosując test NIR Fishera.

4. Wyniki

4.1 Pomiary somatyczne

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów somatycznych w postaci średniej arytmetycznej (\bar{x}) \pm odchylenie standardowe (SD) badanych triathlonistów z grupy eksperymentalnej i kontrolnej wykonane przed i po zakończeniu interwencji treningowej. Badanie różnic pomiędzy wartościami wskaźników somatycznych przed i po zakończeniu treningów wykonano testem t-Studenta dla prób zależnych. Dla porównania różnic początkowych między grupą eksperymentalną a grupą kontrolną przed rozpoczęciem treningów, wykonano test t-Studenta dla prób niezależnych. Nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic w badanych wskaźnikach zarówno w grupie eksperymentalnej jak i kontrolnej oraz między grupami.

Tabela 2. Wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym wybranych wskaźników somatycznych u badanych triathlonistów, przed rozpoczęciem 8 tygodniowego treningu i po nim, z podziałem na grupy eksperymentalną i kontrolną

Zmienna	Grupa E			Grupa K			Różnica między grupowa	
	przed	po	p	przed	po	p	p	
Wiek [lata]	36,1 \pm 2,3	–	–	35,0 \pm 3,3	–	–	–	
BH [cm]	183,7 \pm 6,5	–	–	182,3 \pm 5,8	–	–	–	
BM [kg]	79,8 \pm 11,1	79,9 \pm 12,0	0,87	78,1 \pm 4,6	78,2 \pm 5,4	0,87	0,68	
FFM [kg]	64,1 \pm 6,8	65,9 \pm 5,6	0,09	61,2 \pm 3,1	62,0 \pm 3,1	0,50	0,26	
FM [kg]	15,8 \pm 7,3	14,5 \pm 7,6	0,11	16,9 \pm 2,7	15,5 \pm 5,0	0,27	0,68	
F [%]	19,3 \pm 6,8	17,3 \pm 6,2	0,07	21,6 \pm 2,6	19,6 \pm 5,4	0,20	0,35	
BMI [kg·m⁻²]	23,4 \pm 1,29	23,2 \pm 1,61	0,08	23,6 \pm 2,03	23,3 \pm 2,14	0,20	0,96	

Wyniki podane jako wartości średniej arytmetycznej (\bar{x}) \pm z odchyleniem standardowym (SD). Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, Razem – obie grupy, BH – wysokość ciała, BM – masa ciała, FFM – beztłuszczowa masa ciała, FM – tłuszczowa masa ciała, %F procentowa zawartość tkanki tłuszczowej, BMI – wskaźnik masy ciała, przed-pomiar na początku badania, po-pomiar po zakończeniu interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.

4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas testu stopniowanego na bieżni mechanicznej

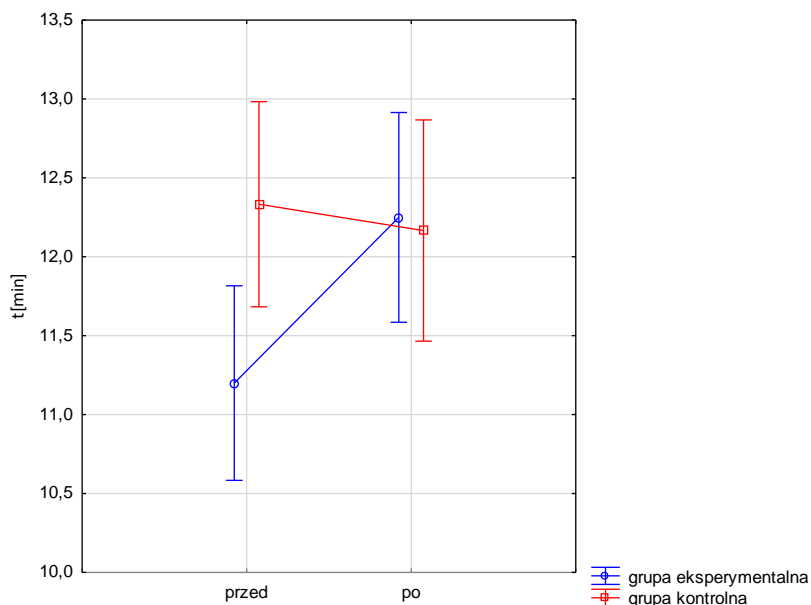
4.2.1. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas biegowego testu stopniowanego

W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy statystycznej wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego (VT2), wyznaczonych na podczas biegowego testu stopniowanego dla grupy eksperymentalnej (Grupa E) oraz kontrolnej (Grupa K) przed oraz po zastosowaniu interwencji treningowej. Zaobserwowano efekt interakcji pomiędzy grupą a powtórzeniem testu dla czasu osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego ($F=4,8$; $p=0,04$), częstości skurczów serca ($F=5,55$; $p=0,03$) oraz prędkości na drugim progu wentylacyjnym ($F=5,25$; $p=0,04$). Dalsza analiza post-hoc wykazała w grupie eksperymentalnej istotne wydłużenie czasu osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego ($p=0,014$), oraz wyższą prędkość biegu przy drugim progu wentylacyjnym ($p=0,013$), a w grupie kontrolnej analiza post-hoc wykazała wyższą wartość częstości skurczów serca przy drugim progu wentylacyjnym ($p=0,035$). Ponadto zaobserwowano istotny efekt grupy ($F=9,65$; $p<0,01$) oraz efekt powtórzenia testu dla wentylacji minutowej płuc ($F=9,65$; $p=0,05$), wskazujący na poprawę tego wskaźnika w obu grupach po okresie treningowym. Dla pozostałych wskaźników nie zaobserwowano istotnych zmian.

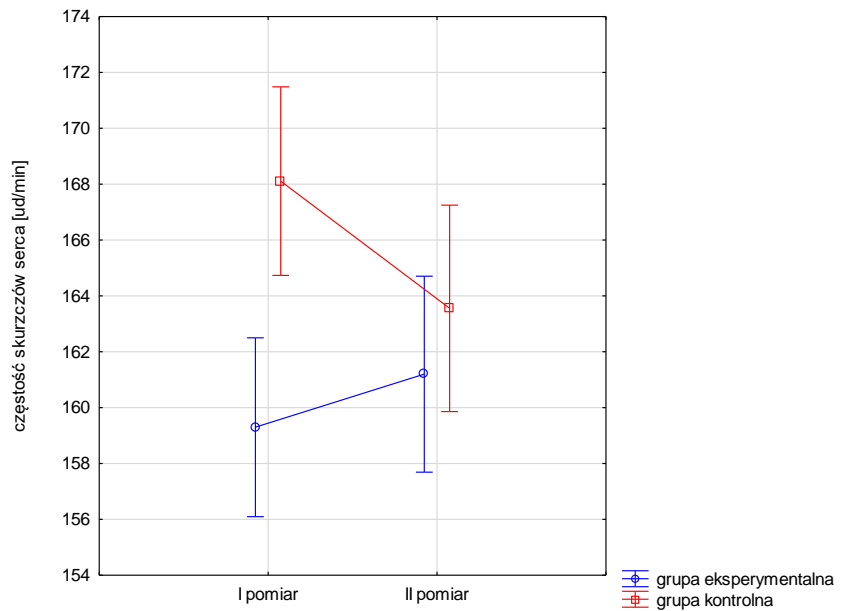
Tabela 3. Wyniki analizy statystycznej wartości wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas biegowego testu stopniowanego przed i po interwencji treningowej

Zmienna	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy			Post hoc Pre vs. Post p
				F	F	F	
				p	p	p	
Czas testu [min^{-1}]	E	11,2±1,6	12,3±2,0	0,35	2,5	4,8	0,014
	K	12,3±2,1	12,2±2,0	0,56	0,13	0,04	
VO_2VT_2 [$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$]	E	3,4±0,4	3,4±0,4	0,16	0,10	0,15	
	K	3,5±0,4	3,5±0,3	0,69	0,76	0,70	
$\text{VO}_2/\text{kg VT}_2$ [$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$]	E	42,7±4,2	43,0±3,3	0,90	0,12	0,00	
	K	44,3±4,3	44,6±3,6	0,36	0,74	0,98	
VEVT_2 [$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$]	E	92,4±10,0	99,6±17,0	9,65	4,67	1,38	
	K	113,4±12,5	115,6±12,0	0,01	0,05	0,26	
HRVT_2 [$\text{sk}\cdot\text{min}^{-1}$]	E	159±8	161±9	1,42	0,94	5,55	0,035
	K	168±11	164±12	0,25	0,35	0,03	
vvt_2 [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	E	11,7±0,8	12,2±1,2	0,33	2,39	5,25	0,013
	K	12,1±1,2	12,0±1,0	2,57	0,14	0,04	

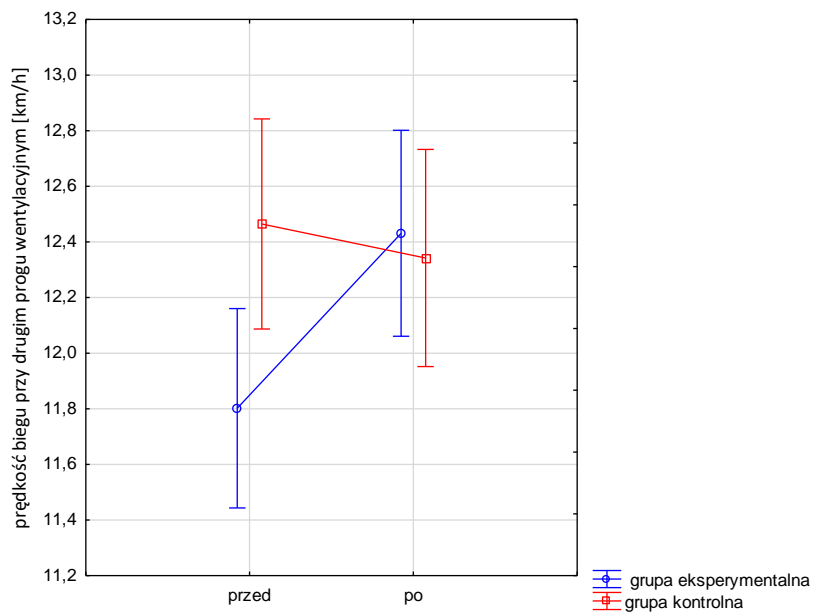
Wyniki podane jako wartości średniej arytmetycznej (\bar{x}) ± z odchyleniem standardowym (SD). Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K- grupa kontrolna, czas testu- czasu osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego, HR VT2 – częstość skurczów serca, VO_2VT_2 – globalny minutowy pobór tlenu, $\text{VO}_2/\text{kg VT}_2$ – minutowy pobór tlenu na kilogram masy ciała, VE VT2 – minutowa wentylacja, vvt_2 -prędkość, przed-pomiar przed interwencją, po-pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.



Rycina 5. Zmiany w czasie osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego w grupach przed i po treningu



Rycina 6. Zmiany w częstotliwości skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego w grupach przed i po treningu



Rycina 7. Prędkości biegu przy drugim progu wentylacyjnym w grupach przed i po interwencji treningowej

4.4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas biegowego testu stopniowanego

W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzanymi pomiarami) dla wartości wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy uzyskanych w biegowym teście stopniowanym dla grupy eksperymentalnej (Grupa E) oraz kontrolnej (Grupa K) przed oraz po zastosowaniu treningu plyometrycznego. Zaobserwowano istotny wpływ treningu na poziom maksymalnej wentylacji minutowej płuc ($F=4,62$; $p=0,05$). Podczas 8-tygodniowego okresu treningowego wskaźnik ten uległ zwiększeniu w obu grupach, niezależnie od zastosowanego typu treningu. Nie zaobserwowano zmian w wartościach pozostałych badanych wskaźników.

Tabela 4. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas biegowego testu stopniowanego

Zmienna	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy			Post hoc Pre vs. Post p
				F	F	F	
				p	p	p	
Czas max [min ⁻¹]	E	18,1±2,8	18,6±2,9	0,08	1,33	0,15	
	K	17,9±2,8	18,1±2,9	0,79	0,26	0,70	
VO₂ max [L·min ⁻¹]	E	4,1±0,4	52,7±6,8	0,49	0,00	0,19	
	K	4,3±0,4	54,5±6,8	0,49	0,95	0,67	
VO₂/kg max [mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	E	52,7±6,8	52,1±6,7	0,76	0,00	0,71	
	K	54,5±6,8	55,1±6,7	0,40	0,95	0,41	
VE max [L·min ⁻¹]	E	150,6±24,6	156,5±20,3	2,99	4,62	0,01	
	K	165,9±24,6	172±20,3	0,10	0,05	0,94	
HR max [sk·min ⁻¹]	E	183±9	184±8	0,00	0,10	3,12	
	K	184±9	182±8	0,99	0,76	0,09	
v max [km·h ⁻¹]	E	16,3±1,4	16,2±1,3	0,22	0,32	0,3	
	K	16,2±1,7	15,9±1,5	0,64	0,61	0,6	

Wyniki podane jako wartości średniej arytmetycznej (\bar{x}) ± z odchyleniem standardowym (SD). Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR max – częstość skurczów serca, VO₂ max – globalny minutowy pobór tlenu, VO₂/kg max – minutowy pobór tlenu na kilogram masy ciała, VE max – minutowa wentylacja, V max – prędkość, przed-pomiar przed interwencją, po-pomiar po interwencji treningowej. Za istotny poziom $p < 0,05$.

4.3 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas rowerowego testu stopniowanego

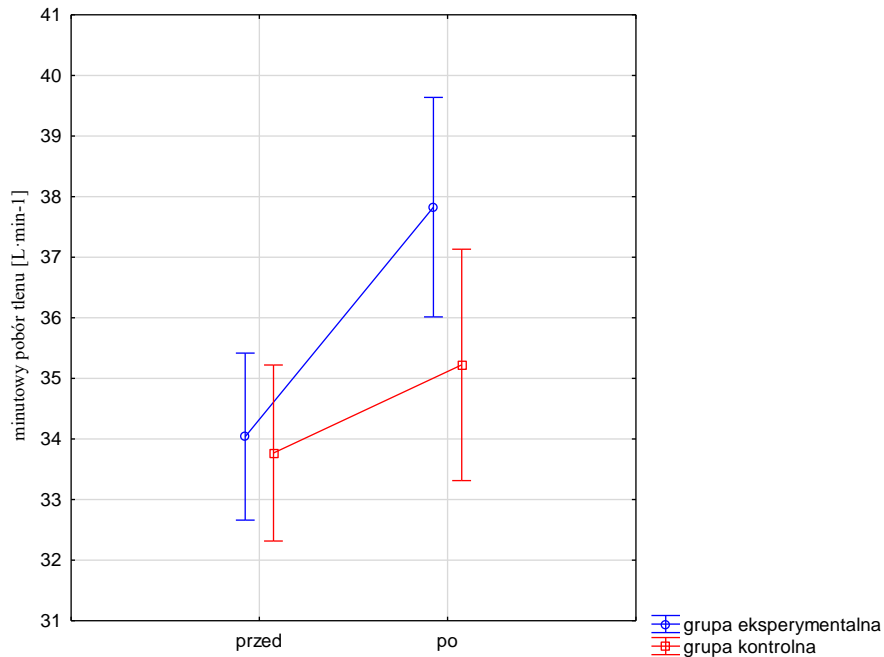
4.3.1 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas rowerowego testu stopniowanego

W tabeli 5 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzanimi pomiarami) wartości wskaźników fizjologicznych uzyskanych w rowerowym teście stopniowanym dla grupy eksperymentalnej (Grupa E) oraz kontrolnej (Grupa K) przed oraz po zastosowaniu treningu plyometrycznego. Analiza statystyczna wskaźników fizjologicznych wykazała istotny efekt interakcji dla globalnego poboru tlenu ($F=16,97$; $p<0,01$). Dalsza analiza post-hoc wykazała istotny statystycznie wzrost tego wskaźnika w grupie eksperymentalnej po okresie treningowym ($p<0,01$). Ponadto, zaobserwowano istotną interakcję częstości skurczów serca na VT2 ($F=4,61$; $p=0,04$). Analiza post-hoc wykazała obniżenie częstości skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego w grupie kontrolnej ($p<0,01$) po okresie treningowym. Dla pozostałych wskaźników analiza statystyczna nie wykazała istotnych statystycznie zmian.

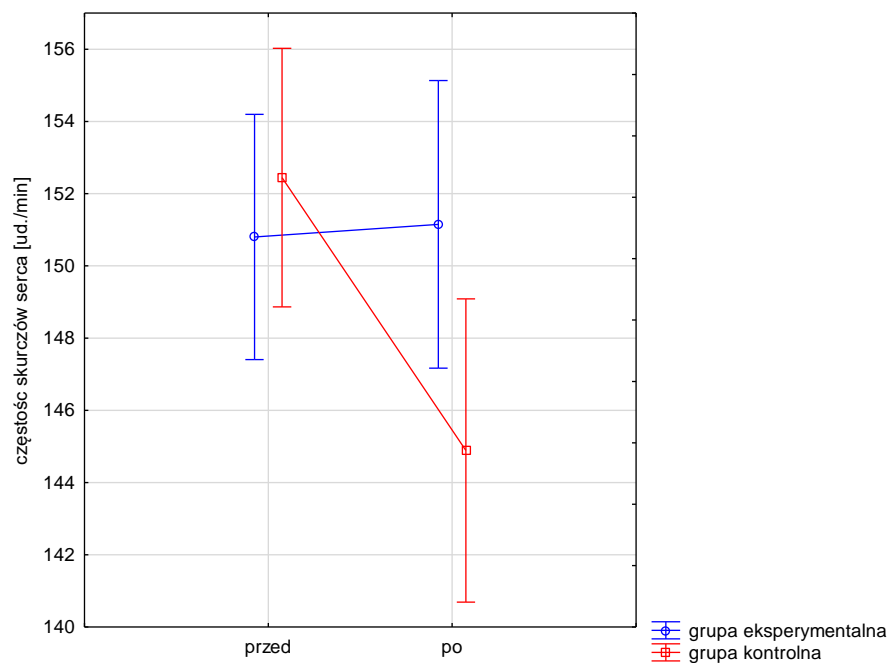
Tabela 5. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego (VT2) podczas rowerowego testu stopniowanego

Zmienna	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy			Post hoc Pre vs. Post
				F	F	F	
				p	p	p	p
Czasvt2 [min ⁻¹]	E	14,1±1,9	14,6±1,8	0,76	0,38	2,54	_____
	K	13,6±2,5	13,4±2,0	0,4	0,55	0,13	_____
Pvt2 [W ⁻¹]	E	234±32	245±29	0,51	0,37	1,78	_____
	K	231±42	227±27	0,48	0,55	0,20	_____
Pvt2 [W·kg ⁻¹]	E	2,97±0,41	3,09±0,38	0,05	1,36	0,21	_____
	K	2,96±0,57	3,01±0,49	0,83	0,26	0,65	_____
VO2vt2 [L·min ⁻¹]	E	2,7±0,3	3,0±0,3	1,08	16,97	4,55	0,00
	K	2,6±0,3	2,7±0,4	0,31	0,00	0,04	_____
VO2/kgvt2 [mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	E	34,04±4,1	37,7±5,2	0,41	15,33	3,03	_____
	K	34,00±3,9	35,2±5,5	0,53	0,00	0,09	_____
VEvt2 [L·min ⁻¹]	E	76,4±13,0	81,7±12,1	0,38	1,08	1,85	_____
	K	82,9±13,5	82,2±11,6	0,55	0,31	0,19	_____
HRvt2 [sk·min ⁻¹]	E	151±11	151±10	0,21	3,83	4,61	_____
	K	152±9	145±14	0,65	0,07	0,04	0,01

Wyniki podane jako wartości średniej arytmetycznej (\bar{x}) \pm z odchyleniem standardowym (SD). Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR VT2 – częstość skurczów serca, VO2 VT2 – globalny minutowy pobór tlenu, VO2/kg VT2 – minutowy pobór tlenu, na kilogram masy ciała, VE VT2 – minutowa wentylacja, Pwt-moc, Pwt2[W/kg] -moc na kilogram masy ciała, przed-pomiar przed interwencją, po-pomiar po interwencji treningowej. Za istotny poziom $p < 0,05$.



Rycina 8. Częstość skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego podczas jazdy na rowerze w grupach przed i po interwencji treningowej



Rycina 9. Minutowy globalny pobór tlenu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego podczas jazdy na rowerze w grupach przed i po interwencji treningowej

4.3.2 Wartości wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas rowerowego testu stopniowanego

W tabeli 6 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzaniem pomiarów) porównujące wartość wskaźników fizjologicznych uzyskanych w teście stopniowanym na ergometrze rowerowym dla grupy eksperymentalnej (Grupa E) oraz kontrolnej (Grupa K) przed oraz po zastosowaniu treningu plyometrycznego. Analiza wskaźników fizjologicznych wykazała wpływ 8 tygodniowego treningu na wzrost wartości maksymalnego poboru tlenu w ujęciu globalnym ($F=10,35$; $p<0,01$) i relatywnym do masy ciała ($F=12,95$; $p<0,01$) oraz maksymalnej wentylacji minutowej płuc ($F=4,63$; $p=0,05$) w obu grupach. Nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic w wielkości pozostałych wskaźników, choć zaobserwowano zwiększenie po okresie treningowym mocy maksymalnej oraz mocy maksymalnej na kilogram masy ciała (odpowiednio $p=0,07$ i $p=0,08$).

Tabela 6. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas testu stopniowanego na ergometrze rowerowym

Zmienna	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy	Efekt: Czasu	Interakcja	Post hoc
				F	F	F	Pre vs. Post
				p	p	p	p
Czas [min-1]	E	21,6±2,3	21,8±2,6	0,02	0,15	0,5	_____
	K	21,9±3,9	21,9±3,0	0,89	0,70	0,83	_____
P max [W-1]	E	363±41	366±35	0,24	3,80	1,82	_____
	K	367±58	383±46,4	0,63	0,07	0,19	_____
P max [W·kg-1]	E	4,6±0,6	4,6±0,6	0,40	3,34	1,58	_____
	K	4,7±0,8	4,9±0,7	0,53	0,08	0,23	_____
VO₂ max [L·min-1]	E	3,6±0,5	3,9±0,4	0,03	12,95	0,001	_____
	K	3,6±0,5	3,9±0,5	0,87	0,00	0,97	_____
VO₂/kg max [mL·min-1·kg-1]	E	45,5±5,9	49,6±7,7	0,10	10,35	0,01	_____
	K	46,7±7,6	50,5±7,7	0,76	0,01	0,92	_____
VE max [L·min-1]	E	157,9±22,1	163,9±19,6	3,00	4,63	0,01	_____
	K	165,9±24,6	172,2±20,3	0,10	0,05	0,93	_____
HR max [sk min-1]	E	180±6	181±5,6	0,00	0,82	0,41	_____
	K	180±7	180±7	0,96	0,38	0,53	_____

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe. Grupa E- grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR max – maksymalna częstość skurczów serca, VO₂ max – maksymalny globalny minutowy pobór tlenu, VO₂/kg max maksymalny minutowy pobór tlenu na kilogram masy ciała, VE max– maksymalna minutowa wentylacja płuc, P max-moc maksymalna, P max [W/kg] – moc maksymalna na kilogram masy ciała, przed-pomiar przed interwencją treningową, po – pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.

4.4 Zmiany wskaźników fizjologicznych podczas biegu przed i po jeździe na rowerze przed interwencją treningową

4.4.1 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z intensywnością progową przed i po 70' jeździe na rowerze przed interwencją treningową

W tabeli 7 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (Test t-Studenta) wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia u badanych zawodników podczas 6 minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością progową (VT2) przed i po jeździe na rowerze.

Tabela 7. Wpływ jazdy na rowerze na zmianę ekonomii biegu z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2 (n=19)

Zmienna	pomiar	x SD	p
HR [sk · min ⁻¹]	przed	157±12	0,00
	po	165±11	
VE [L · min ⁻¹]	przed	102,05±15,93	0,00
	po	113,17±18,34	
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	przed	203,34±13,28	0,92
	po	203,10±11,51	
La [mmol · L ⁻¹]	przed	2,85±1,02	0,00
	po	4,40±1,82	
Skala Borga	przed	12,05±1,13	0,00
	po	14,32±2,24	

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E- grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE-minutowa wentylacja płuc, RE – ekonomia biegu, La– stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar podczas biegu przed jazdą na rowerze, po- pomiar podczas biegu po jeździe na rowerze, Za istotny poziom p < 0,05.

Analiza wskaźników fizjologicznych wykazała, że podczas biegu po 70 minutowej jeździe na rowerze istotnie wzrosła średnia częstość skurczów serca (HR) (p<0,001), wentylacja minutowa płuc (VE) (p<0,001) oraz wzrosło stężenie mleczanu w krwi (La) (p<0,001). Dodatkowo, odczucie wysiłku istotnie wzrosło (p<0,001). Ekonomia biegu nie wykazała istotnej zmiany po jeździe na rowerze (p=0,92).

4.4.2 Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową przed i po 70' jeździe na rowerze przed interwencją treningową

W tabeli 8 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (Test t-Studenta) wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia, mierzonego przy pomocy skali Borga u badanych zawodników podczas 6-minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością startową przed i po jeździe na rowerze.

Tabela 8. Wpływ jazdy na rowerze na zmianę ekonomii biegu z prędkością startową (n=19)

Zmienna	pomiar	x SD	p
HR [sk · min ⁻¹]	przed	170±10	0,02
	po	173±9	
VE [L·min ⁻¹]	przed	124,59±17,54	0,00
	po	131,61±21,14	
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	przed	203,42±13,51	0,48
	po	201,49±12,32	
La [mmol·L ⁻¹]	przed	4,61±1,22	0,01
	po	5,69±1,89	
Skala Borga	przed	14,79±1,44	0,00
	po	16,74±1,28	

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE-minutowa wentylacja, RE – ekonomia biegu, La – stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar podczas biegu przed jazdą na rowerze, po- pomiar podczas biegu po jeździe na rowerze, Za istotny poziom p < 0,05.

Analiza wskaźników fizjologicznych wykazała, że podczas biegu po 70 minutowej jeździe na rowerze istotnie wzrasta średnia częstość skurczów serca (HR) (p=0,02), wentylacja minutowa płuc (VE) (p<0,01), stężenie mleczanu w surowicy krwi (La) (p<0,01). Dodatkowo, subiektywne odczucie wysiłku istotnie wzrosło (p<0,001). Ekonomia biegu nie wykazała istotnej zmiany po jeździe na rowerze (p=0,48).

4.5 Wpływ treningu plyometrycznego na ekonomię biegu

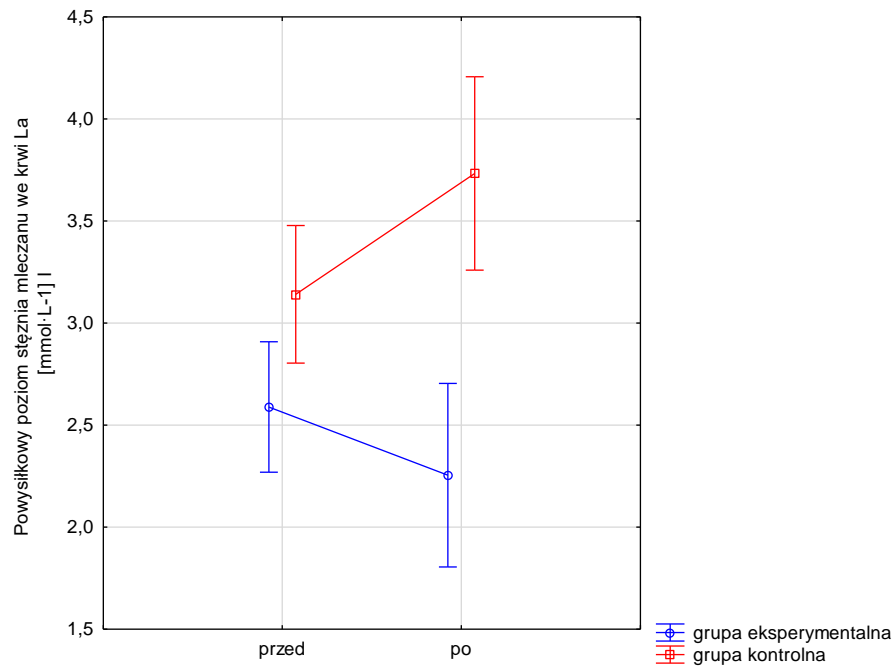
4.5.1 Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu na poziomie progowym

W tabeli 9 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzanymi pomiarami) wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia u badanych zawodników podczas 6 minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu (VT2) przed i po treningu plyometrycznym. Zaobserwowano wpływ interakcji i zastosowanego treningu na stężenie mleczanu ($F=5,0$; $p=0,04$). Po okresie treningowym powysiłkowy stężenie mleczanu było niższe w grupie eksperymentalnej niż kontrolnej ($p=0,02$). Ponadto zastosowane treningi w obu grupach obniżyły częstość skurczów serca przy biegu z intensywnością VT2 ($p=0,02$). Nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic w pozostałych badanych wskaźnikach.

Tabela 9. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej VT2

Zmienna	grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy F p	Efekt: Czasu F p	Interakcja F p	Post hoc Pre vs. Post p
HR [sk min ⁻¹]	E	154±11	150±9	0,80	6,51	0,49	
	K	160±13	153±15	0,38	0,02	0,49	
VE [L·min ⁻¹]	E	104,06±38,17	86,92±18,53	2,04	3,42	0,31	
	K	111,71±13,57	102,48±11,94	0,17	0,08	0,59	
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	E	201,79±13,23	203,40±11,79	0,04	1,19	2,96	
	K	205,06±13,92	197,90±15,44	0,85	0,29	0,10	
La [mmol·L ⁻¹]	E	2,59±1,04	2,26±0,97	3,70	0,39	5,01	0,02
	K	3,14±0,98	3,73±1,8	0,07	0,54	0,04	
Skala Borga	E	12,00±0,82	11,80±0,63	0,77	0,04	0,61	
	K	12,11±1,45	12,44±1,67	0,39	0,85	0,45	

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe. Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE-minutowa wentylacja, RE – ekonomia biegu, La – stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar przed interwencją treningową, po-pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.



Rycina 10. Powysiłkowy poziom stężenia mleczanu podczas biegu na poziomie progowym w grupach przed i po interwencji treningowej

4.5.2 Wpływ treningu plyometrycznego na zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu w tempie startowym

W tabeli 10 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzaniem pomiarów) wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia u badanych zawodników podczas 6 minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością startową przed i po treningu plyometrycznym. Zaobserwowano istotny statystycznie wpływ grupy ($F=6,73$; $p=0,019$) i treningu ($F=7,14$; $p=0,02$) na wartości VE. Badani z grupy eksperymentalnej charakteryzowali się niższymi wartościami VE. Ponadto 8 tygodniowy trening obniżył wartość VE w obu grupach. Po przeprowadzeniu treningu w obu grupach zaobserwowano istotne obniżenie powysiłkowego stężenia mleczanu ($p=0,04$). W pozostałych badanych wskaźnikach nie zaobserwowano zmian.

Tabela 10. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu w tempie startowym

Zmienna	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy F P	Efekt: Czasu F P	Interakcja F p	Post hoc Pre vs. Post p
HR [sk min ⁻¹]	E	169±8	162±10	0,91	4,38	0,15	_____
	K	171±11	167±11	0,35	0,05	0,70	_____
VE [L·min ⁻¹]	E	114,51±11,617	107,21±18,66	6,73	7,14	0,059	_____
	K	133,68±17,96	124,91±18,24	0,02	0,02	0,81	_____
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	E	206,27±9,55	207,57±8,87	0,71	1,40	0,46	_____
	K	200,24±16,93	205,06±13,22	0,41	0,25	0,51	_____
La [mmol·L ⁻¹]	E	4,55±1,15	3,50±1,73	0,38	5,20	0,20	_____
	K	4,67±1,37	3,96±0,83	0,55	0,04	0,66	_____
Skala Borga	E	12,00±0,82	11,80±0,63	0,77	0,04	0,61	_____
	K	12,11±1,45	12,44±1,67	0,39	0,85	0,45	_____

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E- grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE-minutowa wentylacja, RE – ekonomia biegu, La – stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar przed interwencją treningową, po-pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.

4.5.3 Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego po jeździe na rowerze

W tabeli 11 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzanymi pomiarami) wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia u badanych zawodników podczas 6 minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu (VT2) po treningu plyometrycznym po jeździe na rowerze. Zaobserwowano istotny statystycznie wpływ treningu ($F= 8,37$; $p=0,01$) na wartości VE oraz ocenę poziomu zmęczenia ($F= 5,16$; $p=0,04$).

Tabela 11. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego po jeździe na rowerze.

Wskaźnik	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy			Post hoc Pre vs. Post
				F	F	F	
				p	p	p	p
HR [sk·min ⁻¹]	E	163±11	162±10	0,05	1,73	1,12	_____
	K	166±11	161±14	0,83	0,21	0,3	_____
VE [L·min ⁻¹]	E	106,17±19,04	99,29±20,75	3,06	8,37	0,35	_____
	K	120,9±14,83	110,6±13,56	0,10	0,01	0,56	_____
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	E	201,84±12,63	204,45±13,16	0,15	0,59	3,05	_____
	K	204,5±10,69	197,79±14,40	0,71	0,45	0,09	_____
La [mmol·L ⁻¹]	E	4,39±1,76	4,22±1,82	0,67	0,80	1,14	_____
	K	4,51±1,98	5,41±2,80	0,42	0,39	0,30	_____
Skala Borga	E	14,4±2,07	13,2±1,48	0,01	5,16	0,04	_____
	K	14,22±2,54	13,22±2,33	0,93	0,04	0,84	_____

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E- grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE-minutowa wentylacja, RE – ekonomia biegu, La – stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar przed interwencją treningową, po-pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom p < 0,05.

4.5.4. Wpływ treningu plyometrycznego na wartości wybranych wskaźników fizjologicznych podczas biegu z prędkością startową po jeździe na rowerze

W tabeli 12 przedstawiono wyniki analizy statystycznej (ANOVA z powtarzanymi pomiarami) wartości wybranych wskaźników fizjologicznych oraz poziomu zmęczenia, u badanych zawodników podczas 6 minutowego testu wysiłkowego oceniającego ekonomię biegu z prędkością startową po treningu plyometrycznym po jeździe na rowerze. Zaobserwowano istotny statystycznie wpływ treningu (F=6,15; p=0,02) na wartości VE oraz ocenę poziomu zmęczenia (p<0,00). Powtórzenie wysiłku w odległości 8 tygodni wywołało obniżenie VE i mniejszy poziom zmęczenia.

Tabela 12. Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu w tempie startowym po jeździe na rowerze

Wskaźnik	Grupa	Przed	Po	Efekt: Grupy F p	Efekt: Czasu F p	Interakcja F p	Post hoc Pre vs. Post p
HR [sk min ⁻¹]	E	172±8	170±7	0,00	2,20	0,50	_____
	K	173±10	169±11	0,98	0,16	0,49	_____
VE [L·min ⁻¹]	E	123,3±16,5	117,2±20,9	3,32	6,15	0,72	_____
	K	140,9±22,72	128,5±15,29	0,09	0,02	0,41	_____
RE [mlO ₂ kg ⁻¹ km ⁻¹]	E	199,8±12,74	202,8±13,24	0,18	0,31	0,27	_____
	K	203,41±12,29	203,51±13,06	0,68	0,58	0,61	_____
La [mmol·L ⁻¹]	E	5,62±2,48	4,71±1,82	1,49	0,18	2,41	_____
	K	5,8±1,06	7,4±5,24	0,24	0,67	0,14	_____
Skala Borga	E	16,6±1,26	14,5±1,27	0,43	31,55	0,02	_____
	K	16,9±1,36	14,9±1,62	0,53	0,00	0,89	_____

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, HR – częstość skurczów serca, VE – minutowa wentylacja, RE – ekonomia biegu, La – stężenie mleczanu we krwi, przed-pomiar przed interwencją treningową, po-pomiar po interwencji treningowej, Za istotny poziom $p < 0,05$.

4.6 Charakterystyka zrealizowanych obciążeń treningowych w okresie badań

W tabeli 13 przedstawiono charakterystykę obciążeń treningowych zrealizowanych w ciągu 8 tygodni trwania eksperymentu w trzech strefach intensywności: strefa podprogowa, około progowa i nadprogowa, osobno dla każdej z dyscyplin, z podziałem na grupę eksperymentalną i kontrolną.

Tabela 13. Sumaryczny czas trwania obciążenia treningowego w trzech strefach intensywności z podziałem na dyscypliny sportowe w grupie eksperymentalnej i kontrolnej w trakcie 8 tygodni: [hh:mm: ss]

	Strefa podprogowa	Strefa okołoprogowa [hh:mm: ss]	Strefa nadprogowa
Dyscyplina	Grupa eksperymentalna		
Pływanie	4:16:30 (01:54:11 - 09:45:20)	1:13:41 (0:30:52 - 04:03:19)	0:45:30 (0:11:27 - 01:06:49)
Rower	14:57:30 (09:40:05 - 24:35:57)	2:43:56 (02:01:47 - 04:25:13)	0:53:55 (0:24:48 - 01:22:24)
Bieganie	9:04:46 (05:53:43 - 15:12:26)	5:02:53 (03:41:46 - 08:01:57)	1:52:53 (01:01:23 - 04:13:07)
Dyscyplina	Grupa kontrolna		
Pływanie	4:31:00 (02:43:39 - 08:04:48)	1:03:00 (0:43:24 - 02:26:03)	0:45:00 (0:16:50 - 01:33:01)
Rower	18:36:00 (09:40:05 - 24:35:57)	3:30:00 (01:13:47 - 09:25:06)	1:28:15 (0:41:08 - 02:15:52)
Bieganie	6:45:00 (05:31:04 - 15:48:25)	3:54:02 (02:40:51 - 05:57:14)	2:34:00 (01:02:04 - 05:05:26)

Wyniki podane jako wartości mediany z przedziałem ufności.

Porównanie obciążeń treningowych zrealizowanych przez triathlonistów z obu grup porównano testem U-Manna Whitneya, dla każdej strefy osobno. Nie zaobserwowano różnic pomiędzy grupą eksperymentalną i kontrolną w czasie wykonywania treningu w żadnej z badanych stref w żadnej dyscyplinie. Wyniki przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Porównanie czasu trwania treningu w trzech analizowanych strefach w czasie 8-tygodniowego monitorowania intensywności treningu w 3 konkurencjach pomiędzy grupą eksperymentalną a kontrolną

Dyscyplina	Grupa	Strefa		
		podprogowa	okołoprogowa	nadprogowa
Pływanie	$\frac{E}{K}$	p=0,90	p=0,91	p=0,46
Rower	$\frac{E}{K}$	p=0,74	p=0,90	p=0,33
Bieganie	$\frac{E}{K}$	p=0,76	p=0,60	p=0,27

Wyniki testu U-Mana Whitneya, Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, za istotny poziom $p < 0,05$.

5. Dyskusja

Triathlon, pomimo swojej rosnącej popularności, wciąż pozostaje rzadko badanym naukowo sportem. Jego złożoność, wynikająca z konieczności trenowania trzech różnych dyscyplin – pływania, jazdy na rowerze i biegania – w połączeniu z różnorodnością dystansów oraz poziomem startujących zawodników, wymaga dalszych badań, aby lepiej optymalizować trening triathlonistów i poprawić ich wyniki.

Uzyskane wyniki wskazują, że po intensywnej jeździe na rowerze triathloniści AG doświadczali istotnego wzrostu częstości skurczów serca, wentylacji minutowej płuc, stężenia mleczanu we krwi oraz subiektywnego odczucia wysiłku podczas biegu. Pomimo wzrostu wartości wymienionych wyżej wskaźników fizjologicznych, nie zaobserwowano istotnych zmian w ekonomii biegu po jeździe na rowerze u badanych triathlonistów. Wyniki potwierdzają, że wysiłek kolarski wpływa na efektywność biegu, co jest związane z obserwowanymi zmianami w parametrach fizjologicznych wysiłku biegowego.

Niniejsze badanie było pierwszym, które oceniło wpływ treningu plyometrycznego na zmiany wskaźników wydolności tlenowej u triathlonistów. Choć trening ten nie wpłynął na ekonomię biegu, ekonomię biegu po jeździe na rowerze, ani na wartości VO_2 max, to może mieć korzystny wpływ na wytrzymałość u triathlonistów, gdyż osiągnęli oni wyższą prędkość biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego (VT2).

W przeprowadzonej ankiecie wśród triathlonistów tylko 51% zawodników kategorii AG wprowadza trening siłowy do swojego programu treningowego, a jedynie 16,4% z nich zgłasza stosowanie ćwiczeń plyometrycznych w swoich planach treningowych¹⁸⁹. Dotychczas opublikowano wyniki tylko jednego badania oceniającego wpływ treningu siłowego na poziom wskaźników fizjologicznych u triathlonistów. Badanie to wskazuje, że włączenie treningu siłowego do planu treningowego może znacząco poprawić ekonomię jazdy na rowerze, ekonomię biegu (RE) oraz maksymalne wartości siły u triathlonistów AG startujących na długim dystansie¹⁹⁰. Dotychczas nie wykonano badań dotyczących wpływu treningu siłowego u zawodników odnoszących sukcesy na arenie międzynarodowej. Aktualne analizy programów treningowych triathlonistów koncentrują się głównie na pływaniu, bieganiu i jeździe na rowerze,

podczas gdy dostępne dane nie precyzują, czy i w jakim zakresie zawodnicy uwzględniają trening siłowy w swoich planach treningowych.

Pomimo ograniczeń, niniejsze badanie wnosi nowe informacje na temat wpływu treningu plyometrycznego w triathlonie, dostarczając cennych danych dla trenerów, zawodników i naukowców. Przedstawia efekty włączenia treningu plyometrycznego na poziom wydolności tlenowej zawodników i może stanowić punkt wyjścia do dalszych badań. Potencjalnych korzyści płynących z zastosowania plyometrii można oczekiwać w poprawie wytrzymałości u triathlonistów, mimo braku wpływu na ekonomię biegu czy VO_2 max. Ponadto, należy podkreślić potrzebę dalszych badań dotyczących wpływu treningu siłowego, zwłaszcza u zawodników na poziomie elitarnym.

5.1 Wpływ treningu plyometrycznego na zmiany wybranych wskaźników somatycznych

Sportowcy uprawiający dyscypliny wytrzymałościowe, dążą nie tylko do osiągnięcia wysokiego poziomu wskaźników wydolności tlenowej⁸⁹, ale również do utrzymania niskiej masy ciała i niskiego poziomu tkanki tłuszczowej, aby zwiększyć szanse na poprawę wyników w okresie startowym¹³⁹. Wpływa to na poprawę ekonomii ruchu oraz zwiększenie zdolności termoregulacyjnych dzięki korzystnemu stosunkowi masy ciała do powierzchni i redukcji izolacji, jaką daje podskórna tkanka tłuszczowa¹⁴⁰.

Zastosowany trening o charakterze plyometrycznym nie miał istotnego wpływu na wybrane wskaźniki somatyczne w badanej grupie triathlonistów, podobnie jak w trakcie 6-tygodniowego treningu plyometrycznego w grupie biegaczy średnio- i długodystansowych, gdzie nie stwierdzono statystycznie istotnych zmian w zakresie masy ciała ani BMI¹⁴¹. Analizy sugerują, że redukcja tkanki tłuszczowej może nastąpić po przekroczeniu 30 sesji treningowych o charakterze plyometrycznym¹⁴², w przypadku badanych triathlonistów było to 16 jednostek treningowych. Chociaż wyniki metaanalizy wskazują, że trening plyometryczny prowadzi do hipertrofii mięśniowej¹⁴³, skutkującej znacznym zwiększeniem masy mięśniowej, zwłaszcza objętości mięśni kończyn dolnych¹⁴², efektu tego nie udało się zaobserwować u badanych triathlonistów. Przyczyną tego może być zbyt krótki czas trwania treningu, który okazał się niewystarczający do wywołania znaczących zmian w składzie ciała.

Średnia masa ciała badanych triathlonistów wynosiła $79,0 \pm 8,5$ kg, beztłuszczowa masa ciała $63,7 \pm 5,3$ kg, a procentowy udział tkanki tłuszczowej $19,4 \pm 5,6\%$, przy średniej wysokości ciała 183 ± 6 cm. W porównaniu do zawodników na poziomie międzynarodowym, którzy prezentowali średnią masę ciała $70,2 \pm 5,2$ kg oraz procentową zawartość tkanki tłuszczowej $10,4 \pm 2,1\%$, badani triathloniści mieli wyższą średnią masę ciała oraz większy procent zawartości tkanki tłuszczowej⁸⁰. Elitarni sportowcy wytrzymałościowi charakteryzują się niską masą ciała i zawartością tkanki tłuszczowej¹⁴⁴. Wśród triathlonistów na poziomie krajowym i lokalnym, którzy uzyskiwali czasy na dystansie olimpijskim (poniżej 2,5h), średnia masa ciała wynosiła $72 \pm 9,2$ kg, a procent tkanki tłuszczowej $13,8 \pm 4,2\%$. Natomiast dla zawodników osiągających wolniejsze czasy wyścigu (powyżej 2,5 h), wartości te wynosiły odpowiednio $74,8 \pm 9,9$ kg i $19,6 \pm 5,4\%$ ⁸⁴. Wyższy poziom tkanki tłuszczowej korelował z wolniejszym czasem całkowitym i czasem biegu¹⁴⁵, a beztłuszczowa masa ciała była predyktorem wyników etapu kolarskiego i całego triathlonu olimpijskiego⁸⁴, co potwierdza tezę, że minimalizacja tkanki tłuszczowej jest ważna w triathlonie, podobnie jak w innych sportach wytrzymałościowych. Czynniki morfologiczne w istotny sposób korelują z czasem całkowitym triathlonu, wyjaśniając 47% wariacji w wynikach¹⁴⁵.

Masa ciała oraz skład ciała mają istotny wpływ na wartość VO_2 max. W szczególności, triathloniści o większej masie ciała wykazywali niższe wartości VO_2 max w porównaniu do zawodników o mniejszej masie ciała [84]⁸⁴. Ocena składu ciała u sportowców oraz wszystkich osób zaangażowanych w aktywność fizyczną jest bardzo ważna jako determinant ich wydolności¹⁴⁵.

Skład ciała sportowców prezentuje się inaczej w porównaniu do osób, które są nieaktywne fizycznie. Ponadto, różnice te występują również w obrębie różnych grup sportowców, w zależności od ich dyscypliny. Skład ciała sportowców jest dostosowany do specyficznych wymagań i charakterystyki sportów, które uprawiają. Chociaż czas biegu maratońskiego jest predyktorem wyścigu na dystansie Ironmana u triathlonistów, to cechy antropometryczne maratończyków różniły się od triathlonistów¹⁴⁶. Niski procent tkanki tłuszczowej, większa długość segmentów ciała oraz większa masa beztłuszczowa są związane z lepszymi wynikami w zawodach kolarskich i triathlonowych¹⁴⁷. Dodatkowo zaobserwowano różnice w masie mięśniowej oraz obwodzie ramion, ud i łydek między kolarzami a triathlonistami¹⁴⁸. W kolejnych badaniach zaobserwowano, że cechy antropometryczne triathlonistów są bardziej

zbliżone do cech kolarzy, niż do pozostałych grup sportowców, takich jak pływacy czy biegacze^{149 150}.

Wyniki badań pokazują, że zastosowany trening plyometryczny nie wpłynął na wskaźniki somatyczne u badanych triathlonistów. Analiza składu ciała wskazuje, że zawodnicy sportów wytrzymałościowych na międzynarodowym poziomie, w tym triathloniści, prezentują niższą masę ciała i zawartość tkanki tłuszczowej w porównaniu do zawodników na niższych poziomach wytrenowania, co jest istotne dla osiągnięcia lepszych wyników sportowych^{84 145 146}.

5.2 Wpływ treningu plyometrycznego na wskaźniki wydolności tlenowej

Trening plyometryczny jest powszechnie stosowany w sportach drużynowych jak piłka nożna¹⁵¹, hokej^{152 153}, koszykówka^{154 155} i w sportach, gdzie istotna jest siła, szybkość i moc^{156 157}. Ostatnie badania wskazują, że trening o charakterze plyometrycznym może przynieść korzyści w sportach wytrzymałościowych¹⁵⁸.

W triathlonie celem zawodów jest jak najszybsze zakończenie rywalizacji. Aby to osiągnąć, zawodnik musi dysponować wysokim poziomem wydolności tlenowej, który pozwoli mu utrzymać optymalną wydajność podczas całego wyścigu. Najczęściej stosowanymi miarami do oceny wydolności aerobowej triathlonistów są maksymalny pobór tlenu ($VO_2 \max$) i progi metaboliczne⁸⁹. Dodatkowo, inne wskaźniki wykorzystywane w diagnostyce poziomu wydolności aerobową to stężenie mleczanu we krwi (LT), ekonomia biegu (RE) oraz tętno (HR)^{159 160}.

Zawodnicy uczestniczący w tym badaniu charakteryzowali się r maksymalnym minutowym poborem tlenu w stosunku do masy ciała na poziomie $53,6 \pm 6,1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, wartości te były niższe w porównaniu z zawodnikami na poziomie międzynarodowym, u których wartość ta wynosi powyżej $70 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ¹⁶¹. Dotychczas nie przeprowadzono badań dotyczących wpływu treningu o charakterze plyometrycznym na wartości wskaźników maksymalnego poboru tlenu ($VO_2 \max$) oraz progów wentylacyjnych (VT) u triathlonistów. Badania nad wpływem treningu plyometrycznego na poziom wydolności fizycznej głównie obejmowały zawodników takich dyscyplin jak bieganie i piłka nożna^{132 162 163}.

Doniesienia na temat wpływu jednoczesnego treningu siły eksplozywnej i wytrzymałości na adaptacyjne zmiany w wydolności tlenowej i wytrzymałości są rozbieżne i niejednoznaczne.

W niniejszym badaniu wskaźniki charakteryzujące maksymalny poziom wysiłkowy podczas biegu oraz jazdy na rowerze nie wykazały istotnych zmian pod wpływem treningu plyometrycznego. Jednakże zastosowanie tej formy treningu u badanych triathlonistów wpłynęło na wartości niektórych wskaźników charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego podczas biegu (VT2), takich jak czas osiągnięcia VT2 oraz prędkość biegu przy VT2. Czas osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego (VT2) podczas biegu w grupie eksperymentalnej wydłużył się o 9,8% po treningu plyometrycznym, a prędkość biegu przy drugim progu wentylacyjnym (VT2) w grupie eksperymentalnej wzrosła o 4,3%.

Przejście od wysiłku aerobowego do anaerobowego jest kluczową zmienną fizjologiczną w sportach wytrzymałościowych. Termin ten definiowany jest na różne sposoby, takie jak próg mleczanowy (LT), próg beztlenowy (AT), początkowa akumulacja kwasu mlekowego we krwi (OBLA), próg niekompensowanej kwasicy metabolicznej (TDMA)¹⁶⁴. Drugi próg wentylacyjny (VT2), nazywany również punktem kompensacji oddechowej, jest użyteczna w ocenie wydolności aerobowej, ponieważ przekroczenie intensywności przy VT2 prowadzi do akumulacji mleczanu we krwi i hiperwentylacji¹⁶⁵. Przekroczenie intensywności maksymalnej równowagi pomiędzy produkcją i usuwaniem mleczanu powoduje dalszy i gwałtowny wzrost stężenia mleczanu La- i jonów wodorowych H⁺, powodują narastanie zmęczenia a tym samym brak możliwości kontynuowania wysiłku o takiej intensywności¹⁶⁶. Poprawa tego parametru, jak i prędkości uzyskiwanej przy VT2 powinna stanowić jeden z celów w treningu sportowców wytrzymałościowych.

Z tego względu duży nacisk kładzie się na metody treningowe, suplementację oraz warunki środowiskowe, które mogą przyczynić się do poprawy wydolności aerobowej. W grupie badanej wydłużenie czasu osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego oraz wzrost prędkości podczas biegu przy VT2 wskazuje na korzystny efekt treningu plyometrycznego, ponieważ oznacza lepszą zdolność (poprzez wzrost prędkość przy VT2) do tolerowania rozwijającej się wysiłkowej kwasicy metabolicznej.

W sportach wytrzymałościowych sugeruje się, że próg anaerobowy (AT) może być lepszym wskaźnikiem wytrzymałości tlenowej niż maksymalny pobór tlenu (VO₂ max), ponieważ AT może ulegać zmianom bez zmian w maksymalnym poborze

tlenu^{164 167 168}. Takie rezultaty uzyskano w badaniu przeprowadzonym na grupie biegaczy wytrzymałościowych, gdzie trening plyometryczny przyniósł znaczące korzyści niezależnie od przyjętego modelu periodyzacji treningowej (spolaryzowany i piramidalny). Pomimo braku wzrostu relatywnego do masy ciała oraz globalnego maksymalnego poboru tlenu, zawodnicy poprawili swoje wyniki w biegu na 5 km oraz prędkość uzyskiwaną kiedy stężenie mleczanu we krwi wynosiło 4 mmol·L⁻¹⁶⁹. Co ciekawe wprowadzenie nawet krótkotrwałego treningu plyometrycznego, trwającego 6 tygodni i obejmującego mniej niż 1 godzinę tygodniowo do programu treningowego biegaczy średnio- i długodystansowych przyczyniło się do znaczącej poprawy ich wytrzymałości biegowej. Zawodnicy osiągnęli poprawę wyników na dystansie 2,4 km o 3,9%¹⁷⁰. Podobne rezultaty odnotowano wśród wioślarzy, gdzie włączony trening plyometryczny znacząco poprawił uzyskiwane przez nich czasy na dystansie 500 m¹⁷¹.

W grupie eksperymentalnej u badanych triathlonistów nie odnotowano zmiany w maksymalnym minutowym poborze tlenu (VO_2 max) oraz zmian poziomu wskaźników fizjologicznych charakteryzujących drugi próg wentylacyjny (VT2) podczas jazdy rowerem. Podobne rezultaty uzyskano w badaniach przeprowadzonych wśród kolarzy górskich oraz szosowych. Trening plyometryczny nie miał statystycznie istotnego wpływu na zdolności aerobowe, anaerobowe oraz na wyniki jazdy na czas¹⁷². Autorzy pracy sugerują, że korzyści z treningu plyometrycznego mogą pojawić się dopiero kilka tygodni po jego zakończeniu, bliżej sezonu startowego, kiedy celem treningu jest poprawa mocy i szybkości¹⁷². Wśród juniorów trenujących kolarstwo torowe, dodanie treningu plyometrycznego do planu treningowego spowodowało wzrost maksymalnego minutowego poboru tlenu (VO_2 max) o 5%. Należy jednak zauważyć, że badanie miało istotne ograniczenia, takie jak brak grupy kontrolnej oraz pośrednia metoda pomiaru VO_2 max¹⁷³.

Trening plyometryczny, oparty na cyklu rozciągnięcia i skurczu mięśnia, może wpływać na poprawę zdolności mięśni do generowania siły w krótkim czasie. Kluczowym elementem jest minimalizacja czasu pomiędzy fazami rozciągnięcia i skurczu mięśnia, co charakteryzuje tę formę treningu¹²³. Poprzez taki rodzaj treningu może zostać zwiększona aktywacja jednostek motorycznych, z mniejszym przerostem mięśni niż zwykle obserwowanym po treningu siłowym z dużym oporem, zwiększa się zdolność mięśni do generowania mocy, a także sztywności układu mięśniowo-ścięgnistego, co pozwala organizmowi na efektywniejsze kumulowanie i wykorzystywanie energii sprężystej^{108 174}. Trening plyometryczny, który składa się

głównie z ćwiczeń skocznościowych wykorzystujących cykl rozciągnięcia–skrócenia (SSC), poprawia zdolność do efektywnego magazynowania i wykorzystywania energii¹³²¹³³, co zmniejsza zapotrzebowanie na energię podczas biegu¹⁷⁵. Z tego względu trening plyometryczny może być skuteczną formą treningu, który wspomaga poprawę ekonomii biegu oraz wyniki w próbach czasowych u zawodników. Dotychczas przeprowadzono jedno badanie oceniające wpływ treningu plyometrycznego u triathlonistów. Włączenie treningu plyometrycznego do standardowego programu treningowego triathlonistów skutecznie poprawia kontrolę neuromotoryczną podczas biegu po jeździe na rowerze, przywracając wzorce rekrutacji mięśni zbliżone do tych obserwowanych podczas izolowanego biegu¹⁷⁶. To potwierdza skuteczność treningu plyometrycznego w korygowaniu zaburzeń kontroli neuromotorycznej w tej grupie sportowców. Korzystne wyniki neuromotoryczne nie przełożyły się jednak na poprawę ekonomii biegu u triathlonistów. Należy podkreślić niewielką liczbę uczestników tego badania, którą stanowiło jedynie 8 zawodników¹⁷⁶. Badania wskazują, że trening plyometryczny może być wykorzystywany jako efektywna metoda wykorzystywana do poprawy wyników zawodników zarówno w sportach wymagających siły i szybkości, jak i również w wytrzymałości, do jakich można zaliczyć triathlon. Wyniki badania wskazują, że ćwiczenia o charakterze plyometrycznym włączone do planu treningowego, mogą korzystnie wpłynąć na istotne wskaźniki charakteryzujące wydolność tlenową, takie jak czas i prędkość podczas biegu przy drugim progu wentylacyjnym (VT2). Trening ten jednak nie wywołał istotnych zmian w maksymalnym poborze tlenu (VO_2 max), ani w wydolności tlenowej podczas jazdy na rowerze wśród badanych triathlonistów. Brak zmian w wartości VO_2 max, ale poprawa VT2 podczas biegu, może sugerować, że trening plyometryczny wpływa korzystnie na zdolności aerobowe u triathlonistów.

5.3 Zmiany wskaźników fizjologicznych podczas biegu po jeździe na rowerze

Powodzenie w zawodach triathlonowych w dużej mierze zależy od umiejętności przejścia między dyscyplinami, w szczególności między jazdą na rowerze, a bieganiem. Ostatni etap jakim jest bieg jest kluczowy dla ostatecznego wyniku w triathlonie⁸¹.

W niniejszym badaniu udział wzięli zawodnicy startujący na poziomie krajowym i lokalnym, posiadający podobny staż treningowy oraz zbliżone czasy pokonania dystansu olimpijskiego (poniżej 2,5h). W celu oceny wpływu jazdy na rowerze na bieg zastosowano protokół ze stałym obciążeniem na poziomie 70% $\dot{V}O_2$ max, odzwierciedlający stałą intensywność jazdy na dystansie olimpijskim (40 km) w konwencji bez draftingu. Po zejściu z roweru zamontowanego na trenerze, zawodnicy przechodzili do strefy zmian T2, gdzie zakładali buty biegowe i następnie przemieszczali się w stronę bieżni mechanicznej. Wskaźniki fizjologiczne po jeździe na rowerze były monitorowane zarówno przy prędkości biegu na drugim progu wentylacyjnym, jak i podczas biegu z prędkością startową zawodników na 10 km. U badanych triathlonistów intensywna jazda na rowerze wpływa istotnie na wzrost częstości skurczów serca, wentylacji minutowej płuc, stężenia mleczanu we krwi oraz subiektywnego odczucia wysiłku podczas biegu z intensywnością VT2 oraz w tempie startowym. Podczas biegu po jeździe na rowerze z prędkością drugiego progu wentylacyjnego częstość skurczów serca (HR) wzrosła o 5% ($p < 0,00$), wentylacja minutowa (VE) wzrosła o 11% ($p < 0,00$), stężenie mleczanu we krwi (La) wzrosło o 55% ($p < 0,00$), a subiektywne odczucie wysiłku wzrosło o 19% ($p < 0,00$). Przy biegu w tempie startowym wartości te również wzrosły: HR o 2% ($p < 0,02$), VE o 7% ($p < 0,00$), La o 23% ($p = 0,00$), a subiektywne odczucie wysiłku o 14% ($p < 0,00$). Badania innych autorów pokazują, że w czasie biegu po zakończeniu jazdy na rowerze pobór tlenu ($\dot{V}O_2$), częstotliwość oddechu, wentylacja minutowa płuc i częstość skurczów serca są podwyższone w porównaniu do pojedynczego biegu^{73 76 77}. Podczas przejścia z etapu kolarskiego do biegu w triathlonie, zawodnicy muszą dostosować się do zmiany dominującego typu obciążenia, rodzaju skurczów mięśniowych oraz zakresu ruchu w obrębie kończyn dolnych. Jazda na rowerze charakteryzuje się aktywnością bez wpływu sił grawitacyjnych, która angażuje głównie koncentryczne skurcze mięśni i ograniczony zakres ruchu. Z kolei bieganie jest aktywnością o charakterze obciążającym, wymagającą od mięśni kończyn dolnych znacznego udziału skurczów ekscentrycznych oraz wykonywania ruchów w szerszym zakresie wywołując u zawodników narastanie zmęczenia fizjologicznego¹⁷⁷. Triathloniści, niezależnie od poziomu zaawansowania, często odczuwają subiektywny brak koordynacji ruchowej podczas biegu po zakończeniu etapu kolarskiego⁶⁹. W części badań zaobserwowano, że jazda na rowerze ma istotny wpływ na późniejsze wyniki w biegu, jednak inne analizy nie potwierdziły tego efektu^{178 179}. Możliwe, że różnice w wynikach są spowodowane

zastosowaniem odmiennych protokołów badawczych oraz różnym poziomem zaawansowania uczestniczących zawodników oraz stażu treningowego badanych.

Nie zaobserwowano istotnych zmian w ekonomii biegu po intensywnej jeździe na rowerze przy żadnej z badanych prędkości biegu. Pierwsze badania nad wpływem etapu kolarskiego na bieg wskazują na pogorszenie ekonomii biegu po intensywnej jeździe na rowerze wśród zawodników na różnym poziomie sportowym^{71 73 76 77}. Jednak kolejne badania wśród zawodników na poziomie rekreacyjnym pokazały, że zmiana ekonomii biegu u triathlonistów po intensywnym wysiłku kolarskim jest wysoce indywidualna i związana z subiektywnym odczuciem wysiłku⁷⁸. Ekonomia biegu to złożone pojęcie obejmujące kombinację różnych aspektów metabolicznych, krążeniowo-oddechowych, biomechanicznych i neuromięśniowych podczas biegu z submaksymalną intensywnością⁹⁷. Brak zmian w ekonomii biegu po jeździe na rowerze u badanych triathlonistów można wyjaśnić zwiększonym udziałem procesów beztlenowych w biegu po wysiłku kolarskim. Wzrost stężenia mleczanu, wynoszący 55% przy biegu z intensywnością odpowiadającą progowi wentylacyjnemu VT2, oraz o 23% przy biegu w tempie startowym, sugeruje nasilenie metabolizmu beztlenowego podczas biegu u badanych triathlonistów. Te zmiany są zgodne z subiektywnym wzrostem odczuwanego zmęczenia zgłaszanym przez zawodników, co może uzasadniać utrzymanie stabilnej wartości ekonomii biegu poprzez większy udział procesów beztlenowych, wraz z rosnącym obciążeniem fizjologicznym. Ponadto zawodnicy deklarowali wysoki staż treningowy w sportach wytrzymałościowych $9,5 \pm 3,3$ lat w takich dyscyplinach jak triathlon, biegi oraz kolarstwo, dlatego też badani triathloniści, mogą mieć dobrze rozwiniętą zdolność do adaptacji neuromięśniowej w czasie biegu po jeździe na rowerze. Możliwe jest, że reakcje organizmu na wysiłek biegowy po jeździe na rowerze są bardziej złożone i obejmują różne mechanizmy kompensacyjne, które mogą wpływać na stabilność ekonomii biegu, nawet po intensywnym wysiłku na rowerze u triathlonistów⁷⁵.

5.5 Wpływ treningu plyometrycznego na ekonomię biegu

Triathlon to dyscyplina wytrzymałościowa składająca się z trzech konkurencji, w której kluczową rolę odgrywa bieg. Bieganie stanowi istotny predyktor osiągnięć wyników

zarówno mężczyzn, jak i kobiet na dystansie olimpijskim, obejmujących 1,5 km pływania, 40 km jazdy na rowerze oraz 10 km biegu¹⁸⁰.

Ekonomia biegu określana jako ilość zużywanego tlenu przy określonej submaksymalnej prędkości biegu, jest uważana za istotny wskaźnik aerobowy, wśród zawodników uprawiających sporty wytrzymałościowe. Badania nad wpływem treningu plyometrycznego na RE koncentrowały się głównie na biegaczach¹⁰⁹. Dotychczas jedno z badań uwzględniało triathlonistów, jednak obejmowało zawodników z problemami neuromotorycznymi w biegu po jeździe na rowerze⁷⁹, a do tego grupa badana była niewielka (n=8).

Wciąż w literaturze naukowej jest niewiele danych na temat wpływu treningu plyometrycznego na ekonomię biegu wśród triathlonistów, co skłaniało do przeprowadzenia badania, zwłaszcza, że trening ten mógł wpłynąć na poprawę RE. Zawodnicy przeszli testy oceniające ekonomię biegu z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2 oraz z prędkością startową na 10 km w triathlonie oraz ocenę ekonomii biegu po jeździe na rowerze przy z tymi samymi prędkościami. Zawodnicy kategorii AG, rywalizują na co dzień w konwencji bez draftingu, dlatego jazda na rowerze odbywała się ze stałą intensywnością, a czas tego wysiłku (70 minut przy intensywności 70% VO₂ max) był zbliżony do czasu pokonania odcinka rowerowego na dystansie olimpijskim w triathlonie, czyli 40 km.

U badanych triathlonistów trening plyometryczny nie wpłynął istotnie na ekonomię biegu przy żadnej z testowanych prędkości, zarówno przed, jak i po jeździe na rowerze. Analiza stężenia mleczanu w trakcie biegu z prędkością odpowiadającą VT2 istotnie wykazała, że 8 tygodniowy trening plyometryczny obniża jego powysiłkowe stężenie.

Ćwiczenia plyometryczne to ćwiczenia, które polegają na obciążaniu mięśni podczas ekscentrycznego skurczu, a następnie natychmiastowe (w ciągu <0,2 s) przejście do skurczu koncentrycznego^{134 181}. Takie ćwiczenia poprawiają funkcjonowanie cyklu rozciągnięcia – skurcz oraz prowadzą do adaptacji neuromięśniowych^{181 185}. Celem takiego treningu jest kształtowanie zdolności do wyzwolania dużej siły w jak najkrótszym czasie¹²³. Trening plyometryczny może poprawić zdolność magazynowania i wykorzystywania energii sprężystej¹³², co prowadzi do zmniejszenia zużycia energii podczas biegania¹⁷⁵. Badania eksperymentalne wykazały skuteczność treningu plyometrycznego w poprawie ekonomii biegu (RE) u biegaczy. Pierwsze badania oceniające wpływ 9-tygodniowego

treningu plyometrycznego przeprowadzono na zawodnikach trenujących biegi na orientację. Po zakończeniu programu odnotowano poprawę czasu na dystansie 5 km (o 8%) oraz poprawę ekonomii biegu (o 3,1%), przy braku wzrostu maksymalnego minutowego poboru tlenu¹⁸². Kolejne badania uwzględniające krótszy okres treningów plyometrycznych u biegaczy (6 tygodni) wykazały poprawę czasu biegu na 3 km (o 2,7%) i RE przy każdej z testowanych prędkości, podczas gdy nie odnotowano żadnych zmian w poziomie $\text{VO}_2 \text{ max}$ ¹⁰⁸, w kolejnych badaniach poprawę RE wśród biegaczy długodystansowych odnotowano tylko przy jednej z testowanych prędkości – $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ¹⁸³.

Zastosowany trening plyometryczny nie wywołał istotnych zmian w ekonomii biegu u badanych triathlonistów przy żadnej z testowanych prędkości oraz nie wpłynął istotnie na ekonomię biegu po jeździe na rowerze, co jest sprzeczne z wynikami uzyskiwanymi u biegaczy^{108 109 182 183}. Może to wynikać z różnic w technice biegu, poziomie wytrenowania oraz różnic indywidualnych między zawodnikami. Dotychczas badania w większości uwzględniały biegaczy wytrzymałościowych na różnych dystansach i wysokim poziomie wytrenowania¹⁸⁴. Badani triathloniści byli zawodnikami na poziomie lokalnym i charakteryzowali się podobnym poziomem sportowym w triathlonie, ale być może różniącym się pod względem efektywności biegania i techniki biegu ze względu na równoczesne uprawianie 3 konkurencji oraz na różny stażu treningu biegowego, dlatego wpływ treningu plyometrycznego na badane wskaźniki mógł być bardzo indywidualny. Niektórzy autorzy wskazują, że poprawa ekonomii biegu może być tylko widoczna, przy wyższych prędkościach biegu¹⁸³, którą być może triathloniści na tym poziomie nie osiągnęli, jednak ostatnia analiza wykazała, że trening plyometryczny może poprawić ekonomię biegu przy prędkościach mniejszych niż $12,00 \text{ km/h}$ ¹⁸⁴. Ponadto trening ich trwał 8 tygodni, a to krócej niż zalecany czas sugerowany w najnowszych analizach. Ostatnia metaanaliza (2022)¹⁰⁹ dotycząca treningu plyometrycznego sugeruje, aby osiągnąć poprawę ekonomii biegu, najlepiej byłoby, gdyby trening plyometryczny trwał, dłużej niż 10 tygodni¹⁰⁹ pomimo, że w niektórych badaniach zmiany były już obserwowane po 6–8 tygodniach takiego treningu^{109 183}. Być może okres treningowy, w którym znajdowali się triathloniści podczas badań, ograniczył zmiany w ekonomii biegu, ze względu na większą objętość treningową, niż intensywność. Zakończenie badań było 2 miesiące przed rozpoczęciem sezonu startowego, który trwa w Polsce od połowy maja aż do końca września. Pomimo, że analiza nie ujawniła istotnych różnic w czasie i strefach treningowych

między grupą E a grupą K, warto zauważyć, że zawodnicy w obu grupach byli indywidualnie nadzorowani przez własnych trenerów. W związku z tym, przyszłe badania powinny uwzględniać jednolite protokoły treningowe, aby lepiej kontrolować zmienność w stosowanych metodach treningowych i umożliwić dokładniejsze oceny ich wpływu na wyniki ekonomii biegu. Ocena ekonomii biegu poprzez pomiar zużycia tlenu (VO_2), nie uwzględnia różnic w wykorzystaniu energii z metabolizmu tlenowego i beztlenowego przy danej prędkości biegu, co może prowadzić do nieprecyzyjnych wyników. Być może warto rozważyć pomiar kosztu energetycznego do oceny zawodników na niższym poziomie wytrenowania.

Wiele sportów wymaga połączenia treningu siłowego i wytrzymałościowego dla osiągnięcia lepszych wyników. Badania pokazują, włączenie treningu siłowego do sportów wytrzymałościowych może stanowić jedną ze strategii poprawy wskaźników wytrzymałościowych^{185 186 187 188}. W przeprowadzonej ankiecie tylko 51% triathlonistów kategorii AG wprowadza trening siłowy do swojego programu treningowego¹⁸⁹. Badania pokazują, że osoby, które nie włączają treningu siłowego, jako główną przyczynę wskazują na brak czasu, oraz brak wiedzy dotyczącej postępów i poprawnej techniki ćwiczeń. Autorzy badań sugerują, że mała ilość treningu siłowego w planach treningowych, spowodowana jest również małą wiedzą u trenerów z zakresu stosowania treningu siłowego w tak złożonej dyscyplinie jaką jest triathlon¹⁸⁹. Dotychczas przeprowadzono jedno badanie analizujące wpływ treningu siłowego na zmiany fizjologiczne u triathlonistów¹⁹⁰ oraz jedno badanie dotyczące wpływu treningu plyometrycznego na adaptacje neuromięśniowe w tej grupie sportowców¹⁷⁶. 26-tygodniowy program treningu siłowego z progresywnym obciążeniem (12 tygodni z umiarkowanym obciążeniem, 12 tygodni trening z dużym obciążeniem) w połączeniu z regularnym treningiem wytrzymałościowym, może znacząco poprawić ekonomię jazdy na rowerze, ekonomię biegu (RE) oraz maksymalne wartości siły u triathlonistów AG startujących na długim dystansie¹⁹⁰. Analizy wykazały, że lepsze wyniki w poprawie ekonomii biegu można osiągnąć dzięki treningowi z dużym obciążeniem w porównaniu z ćwiczeniami o charakterze eksplozywnym¹⁰⁹.

Brakuje wystarczającej liczby badań dotyczących wpływu treningu siłowego i plyometrycznego na wyniki triathlonistów, co wskazuje na potrzebę dalszych badań w tej dziedzinie. Niedostateczna wiedza zawodników i trenerów na temat korzyści płynących z tych treningów może ograniczać ich stosowanie, mimo że mogą one znacząco poprawić wyniki sportowe.

5.6 Charakterystyka zrealizowanych obciążeń treningowych

Triathlon obejmuje wiele formatów rywalizacji od mieszanej sztafety trwającej (około 20 min) po wyścig sprinterski (750 m-20 km-5 km), dystans olimpijski (1,5 km-40 km-10 km) czy triathlon długodystansowy (Ironman, ½ Ironmana). Oprócz dużych objętości treningowych charakterystycznych w sportach wytrzymałościowych, trening trzech różnych dyscyplin sportowych jednocześnie wymaga starannego planowania dużej liczby sesji treningowych w tygodniu¹³.

Zawodnicy biorący udział w badaniach zostali zrekrutowani z lokalnych klubów sportowych lub trenowali pod okiem indywidualnych trenerów, co utrudniło utrzymanie jednolitego programu treningowego dla wszystkich badanych. Rejestrację obciążeń treningowych zawodnicy wykonywali indywidualnie i odbywała się na podstawie prowadzonego przez zawodników dziennika treningowego. Intensywność każdego treningu była monitorowana za pomocą własnych pulsometrów zawodników i analizowana za pomocą dedykowanych aplikacji. Na podstawie wyników pierwszego testu stopniowego na bieżni mechanicznej oraz na ergometrze rowerowym wyznaczano trzy strefy intensywności dla zawodników w odniesieniu do częstości skurczów serca na minutę: poniżej drugiego progu wentylacyjnego (strefa podprogowa), oraz strefa okołoprogowa ($HRVT2 \pm 3 \text{sk.min}^{-1}$), powyżej tego progu (strefa nadprogowa). Strefy intensywności zostały wyznaczone dla każdej dyscypliny oddzielnie. Porównanie obciążeń treningowych zrealizowanych przez triathlonistów z obu grup porównano dla każdej strefy osobno. Nie zaobserwowano różnic pomiędzy grupą eksperymentalną i kontrolną w czasie wykonywania treningu w żadnej z badanych stref w żadnej dyscyplinie.

Najwięcej czasu badani triathloniści, spędzali na treningu kolarskim, ze względu na to, że to etap rowerowy ma największy udział czasowy w wyścigu triathlonowym. W triathlonie na dystansie olimpijskim zawodnicy spędzają około 15% całkowitego czasu wyścigu na pływaniu, 55% na jeździe na rowerze i 30% na bieganiu, podczas gdy na dystansie Ironman triathloniści spędzają około 10% całkowitego czasu na pływaniu, 55% na jeździe na rowerze i 35% na biegu⁸¹. Pomimo najmniejszego procentowego udziału pływania w wyścigu triathlonowym, zawodnicy ogólnie poświęcali niewiele czasu na tę dyscyplinę, średnio około jednej godziny tygodniowo. Powodem tego były ograniczenia w trakcie trwania badania, które obejmowały zamknięcie obiektów

sportowych, w tym pływalni, w związku z trwającą pandemią SARS-CoV-2 (COVID-19). Zawodnicy trenowali średnio 6 godzin i 8 minut tygodniowo, z odchyleniem standardowym wynoszącym 1 godzinę i 51 minut, bez uwzględnienia treningu plyometrycznego. Jest to krótszy czas treningowy niż ten zgłaszany przez zawodników AG przygotowujących się do dłuższych dystansów, takich jak ½ Ironman czy Ironman¹⁵ (12–13 h/tydzień), ale większy niż u zawodników przygotowujących się do biegu maratońskiego (5 h/tydzień)¹⁵. Rekrutowani uczestnicy to głównie zawodnicy startujący na krótszych dystansach w zawodach lokalnych. Dodatkowo, ograniczenia związane z pandemią utrudniały im udział w treningach grupowych, co mogło wpłynąć na skrócenie czasu treningowego i motywację do treningów.

Zgodnie z modelem Skinnera i McLellana¹⁹¹ rozkład intensywności treningu znajduje się w trzech strefach treningowych: strefa 1, poniżej pierwszego progu wentylacyjnego (<VT1); strefa 2, między pierwszym a drugim progiem wentylacyjnym (VT1-VT2); strefa 3, powyżej drugiego progu wentylacyjnego (>VT2). Najwięcej czasu badani zawodnicy poświęcili na trening w strefie podprogowej 67%, następnie 23% w strefie okołoproęgowej oraz 10% czasu treningowego w strefie nadprogowej. Badania wskazują, że zawodnicy trenujący sporty wytrzymałościowe najwięcej czasu powinni spędzać w strefie 1 (poniżej VT1), około 70–90% czasu^{192 193 194}. Trening spolaryzowany, charakteryzuje się wysokim udziałem czasu treningowego spędzonego zarówno w strefie 1, jak i strefie 3, przy jednoczesnym minimalnym zaangażowaniu w strefie 2. Przykładowo, w takim modelu treningowym 80% czasu może być poświęcone na wysiłek w strefie 1, 5% w strefie 2, a 15% w strefie 3. Ważne jest, aby udział strefy 1 był zawsze większy niż strefy 3, a strefy 3 większy niż strefy 2. Rozkład intensywności treningu z rozkładem piramidalanym charakteryzuje się gromadzeniem wyższego odsetka czasu treningu w strefie 2 (15–20%) i mniejszego w strefie 3, ale tak jak w przypadku modelu spolaryzowanego, najwyższy odsetek treningu ma miejsce w strefie 1¹⁹⁵. Badanie dotyczące efektywności rozkładu intensywności treningu przeprowadzono z udziałem 18 rekreacyjnych triathlonistów. Uczestników podzielono na dwie grupy: jedna realizowała trening z rozkładem spolaryzowany (POL), a druga z piramidalny (PYR). Oba modele treningu wykazały istotny wpływ na wyniki triathlonistów, w każdej z trzech dyscyplin. Intensywność treningu w strefie 2 była związana z lepszymi wynikami w zawodach ½ Ironmana wśród triathlonistów w kategorii AG. Triathloniści w grupie PYR, którzy spędzili więcej czasu >VT2, uzyskali gorsze czasy w etapie biegowym i w zawodach triathlonowych¹⁹⁶.

Powyższe analizy wskazują, że rozkład intensywności treningu u badanych triathlonistów, może być zbyt intensywny, zwłaszcza w strefie okołoprogowej i nadprogowej. Pomimo że większość czasu spędzano w strefie podprogowej, co jest zgodne z zaleceniami dla sportów wytrzymałościowych, wysoki udział strefy 2 i 3 może sugerować, że ogólny rozkład intensywności treningu nie jest optymalnie dopasowany do najlepszych praktyk treningowych. Zbyt duża ilość treningów o wysokiej intensywności może skutkować przetrenowaniem sportowca i zwiększyć ryzyko urazów¹⁹⁷.

Należy podkreślić, że są to pierwsze badania dotyczące oceny wpływu treningu plyometrycznego z udziałem triathlonistów. Konieczne są kolejne badania u zawodników zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym, w celu oceny wpływu treningu plyometrycznego na wyniki sportowe oraz wydolność triathlonistów. Poznanie potencjalnych korzyści płynących z tego rodzaju treningu może przyczynić się do optymalizacji przygotowań i osiągnięć triathlonistów w zawodach. Warto również zaznaczyć, że od 2020 roku do programu igrzysk olimpijskich wprowadzono sztafety mieszane (250–300 m pływania, 5–8 km jazdy na rowerze i 1,5–2 km biegu), które obejmują krótkie dystanse i charakteryzują się dużą intensywnością oraz znacznie wyższymi średnimi prędkościami w stosunku do dystansu olimpijskiego (1,5 km-40 km-10 km)¹⁹⁸.

Ograniczenia badań

Jednym z kluczowych ograniczeń niniejszego badania była stosunkowo niewielka grupa uczestników. Pandemia COVID-19 w znaczący sposób wpłynęła na możliwość rekrutacji oraz dostęp do uczestników, co ograniczyło liczebność grupy badanej. Dodatkowo, trudności związane z pandemią przyczyniły się do nieukończenia testów przez wszystkich uczestników, którzy zostali pierwotnie zrekrutowani. Kolejnym ograniczeniem był brak jednolitego planu treningowego wśród badanych zawodników. Badanie również obejmowało ograniczony zakres pomiarów. W przyszłych badaniach warto uwzględnić szerszy zakres pomiarów biomechanicznych oraz rozszerzyć analizę o dodatkowe wskaźniki biochemiczne.

6. Wnioski

- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni wydłuża czas osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego oraz prowadzi do wzrostu prędkości biegu, przy której triathloniści osiągają VT2.
- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni nie wpływa na wskaźniki charakteryzujące VT2 podczas jazdy na rowerze.
- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni nie wpływa na wskaźniki fizjologiczne charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas testu stopniowanego na ergometrze rowerowym oraz bieżni mechanicznej u triathlonistów
- Nie zaobserwowano istotnych zmian w ekonomii biegu po intensywnej jeździe na rowerze podczas biegu z intensywnością VT2 oraz w tempie startowym.
- Intensywna jazda na rowerze wpływa na wzrost częstości skurczów serca, wentylacji minutowej płuc, stężenia mleczanu we krwi oraz odczucie wysiłku podczas następującego po nim biegu z intensywnością VT2 oraz biegu z prędkością startową.
- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni obniża powysiłkowe stężenie mleczanu po wysiłku biegowym na poziomie drugiego progu wentylacyjnego (VT2).
- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni nie wpływa na ekonomię biegu z intensywnością VT2 oraz z prędkością startową.
- Trening o charakterze plyometryczny realizowany przez 8 tygodni nie wpływa na ekonomię biegu z intensywnością VT2 oraz z prędkością startową po jeździe na rowerze

7. Bibliografia

- ¹ Kukanovich, O. R. (2023). Brief History and Description of Some Sports. *Texas Journal of Medical Science*, 19, 35-38.
- ² Scott, W. A. (2004). Ironman triathlon case history. *Current sports medicine reports*, 3(3), 163-164.
- ³ Markus, G., Arimany, A. (2019). ITU triathlon history. *Triathlon Medicine*.
- ⁴ Fister, I., Fister, D., Rauter, S., Mlakar, U., Brest, J., Fister, I. (2019). Deep analytics based on triathlon athletes' blogs and news. In *Recent Advances in Soft Computing: Proceedings of 23rd International Conference on Soft Computing (MENDEL 2017) Held in Brno, Czech Republic, June 20-22, 2017* (pp. 279-289). Springer International Publishing.
- ⁵ Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes?. *International journal of sports physiology and performance*, 5(3), 276-291.
- ⁶ Tønnessen, E., Sylta, Ø., Haugen, T. A., Hem, E., Svendsen, I. S., & Seiler, S. (2014). The road to gold: training and peaking characteristics in the year prior to a gold medal endurance performance. *PloS one*, 9(7), e101796.
- ⁷ Sleivert, G. G., Rowlands, D. S. (1996). Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Medicine*, 22(1), 8-18.
- ⁸ Sleivert, G. G., Wenger, H. A. (1993). Physiological predictors of short-course triathlon performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 25(7), 871-876.
- ⁹ Millet, G. P., Vleck, V. E. (2000). Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *British journal of sports medicine*, 34(5), 384-390.
- ¹⁰ Coutts, A. J., Slaterry, K. M., Wallace, L. K. (2007). Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes. *Journal of science and medicine in sport*, 10(6), 372-381.
- ¹¹ Iaia, F. M., Hellsten, Y., Nielsen, J. J., Fernström, M., Sahlin, K., Bangsbo, J. (2009). Four weeks of speed endurance training reduces energy expenditure

- during exercise and maintains muscle oxidative capacity despite a reduction in training volume. *Journal of applied physiology*, 106(1), 73-80.
- ¹² Knechtle, B., Knechtle, R., Stiefel, M., Zingg, M. A., Rosemann, T., Rüst, C. A. (2015). Variables that influence Ironman triathlon performance—what changed in the last 35 years?. *Open access journal of sports medicine*, 277-290.
- ¹³ Millet, G. P., Vleck, V. E., and Bentley, D. J. (2011). Physiological requirements in triathlon. *J. Hum. Sport Exerc.* 6, 184–204. doi: 10.4100/jhse.2011.62.0
- ¹⁴ Vleck, V., Millet, G. P., & Alves, F. B. (2014). The impact of triathlon training and racing on athletes' general health. *Sports Medicine*, 44, 1659-1692.
- ¹⁵ Esteve-Lanao, J., Moreno-Pérez, D., Cardona, C. A., Larumbe-Zabala, E., Muñoz, I., Sellés, S., & Cejuela, R. (2017). Is Marathon training harder than the ironman training? an ECO-method comparison. *Frontiers in physiology*, 8, 298.
- ¹⁶ Mujika, I. (2014). Olympic preparation of a world-class female triathlete. *International journal of sports physiology and performance*, 9(4), 727-731.
- ¹⁷ Sinisgalli, R., de Lira, C. A., Vancini, R. L., Puccinelli, P. J., Hill, L., Knechtle, B., Andrade, M. S. (2021). Impact of training volume and experience on amateur Ironman triathlon performance. *Physiology & behavior*, 232, 113344.
- ¹⁸ Arroyo-Toledo, J. J., Clemente, V. J., & González-Rave, J. M. (2013). The effects of ten weeks block and reverse periodization training on swimming performance and body composition of moderately trained female swimmers. *Journal of Swimming Research*, 21(1).
- ¹⁹ Zapico, A. G., Calderon, F. J., Benito, P. J., Gonzalez, C. B., Parisi, A., Pigozzi, F., Di Salvo, V. (2007). Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: a longitudinal study. *Age*, 20, 20-21.
- ²⁰ Clemente-Suárez, V. J., Dalamitros, A., Ribeiro, J., Sousa, A., Fernandes, R. J., & Vilas-Boas, J. P. (2017). The effects of two different swimming training periodization on physiological parameters at various exercise intensities. *European journal of sport science*, 17(4), 425-432.
- ²¹ Pichot, V., Busso, T., Roche, F., Garet, M., Costes, F., Duverney, D., Barthélémy, J. C. (2002). Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study. *Medicine & science in sports & exercise*, 34(10), 1660-1666.

- ²² Clemente-Suárez, V. J., Delgado-Moreno, R., González, B., Ortega, J., & Ramos-Campo, D. J. (2019). Amateur endurance triathletes' performance is improved independently of volume or intensity based training. *Physiology & behavior*, *205*, 2-8.
- ²³ Reuter, B. (2012). *Developing endurance*. Human Kinetics.
- ²⁴ Issurin, V. B. (2010). New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports medicine*, *40*, 189-206.
- ²⁵ Baldassarre, R., Bonifazi, M., Zamparo, P., & Piacentini, M. F. (2017). Characteristics and challenges of open-water swimming performance: a review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(10), 1275-1284.
- ²⁶ Bentley, D. J., Millet, G. P., Vleck, V. E., McNaughton, L. R. (2002). Specific aspects of contemporary triathlon. *Sports Medicine*, *32*(6), 345-359.
- ²⁷ Gay, A., López-Contreras, G., Fernandes, R. J., Arellano, R. (2019). Is Swimmers Performance Influenced by Wetsuit Use? *International journal of sports physiology and performance*, 1-17.
- ²⁸ Chatard, J. C., Wilson, B. (2003). Drafting distance in swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *35*(7), 1176-1181.
- ²⁹ Bassett Jr, D. R., Flohr, J., Duey, W. J., Howley, E. T., & Pein, R. L. (1991). Metabolic responses to drafting during front crawl swimming. *Medicine and science in sports and exercise*, *23*(6), 744-747.
- ³⁰ Chatard, J. C., Chollet, D., & Millet, G.. (1998). Performance and drag during drafting swimming in highly trained triathletes. *Medicine and science in sports and exercise*, *30*(8), 1276-1280.
- ³¹ Silva, A. J., Rouboa, A., Moreira, A., Reis, V. M., Alves, F., Vilas-Boas, J. P., Marinho, D. A. (2008). Analysis of drafting effects in swimming using computational fluid dynamics. *Journal of sports science & medicine*, *7*(1), 60
- ³² Fröhlich M, Klein M, Pieter A, Emrich E, Gießing J. Consequences of the three disciplines on the overall result in olympic-distance triathlon. *Int J Sports Sci Eng*. 2008;2:204–10.
- ³³ Peeling, P., Landers, G. (2009). Swimming intensity during triathlon: a review of current research and strategies to enhance race performance. *Journal of sports sciences*, *27*(10), 1079-1085.

- ³⁴ Aoyagi, A., Ishikura, K., Nabekura, Y. (2021). Exercise intensity during Olympic-distance triathlon in well-trained age-group athletes: an observational study. *Sports*, 9(2), 18.
- ³⁵ Le Meur, Y., Hausswirth, C., Dorel, S., Bignet, F., Brisswalter, J., Bernard, T. (2009). Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *European Journal of Applied Physiology*, 106, 535-545.
- ³⁶ Barrero, A., Chaverri, D., Erola, P., Iglesias, X., Rodríguez, F. A. (2014). Intensity profile during an ultra-endurance triathlon in relation to testing and performance. *International journal of sports medicine*, 1170-1178.
- ³⁷ Scorcine, C., Pereira, R., Madureira, F., & Colantonio, E. (2017). Contribution of swimming, cycling and running in the final performance in different distances of triathlon races. *MOJ Sports Med*, 1(5), 00027.
- ³⁸ Toussaint, H., Truijens, M. (2005). Biomechanical aspects of peak performance in human swimming. *Animal biology*, 55(1), 17-40.
- ³⁹ Bottoni, A., Lanotte, N., Boatto, P., Bifaretti, S., & Bonifazi, M. (2011). Technical skill differences in stroke propulsion between high level athletes in triathlon and top level swimmers. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 351-362.
- ⁴⁰ Toussaint, H. M. (1990). Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 22(3), 409-415.
- ⁴¹ Millet, G. P., Chollet, D., Chabies, S., Chatard, J. C. (2002). Coordination in front crawl in elite triathletes and elite swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 23(02), 99-104.
- ⁴² de Souza-Castro, F. A., Villas-Boas, J. P., & Stringhini-Guimarães, A. C. (2007). Effects of swimming intensity and breathing in front crawl body roll angles for swimmers and triathletes. *Brazilian J Biomech*, 7(13), 85-90.
- ⁴³ Landers, G. J., Blanksby, B. A., Ackland, T. R., & Monson, R. (2008). Swim positioning and its influence on triathlon outcome. *International journal of exercise science*, 1(3), 96.
- ⁴⁴ Olbrecht, J. (2011). Triathlon: swimming for winning. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 233-246.

- ⁴⁵ Nunes, R. S. M., HS, H. S. M., Vieir, E. (2020). Individualized program with periodization with low intensity and biomechanics improves swimming triathlete technique and performance. *Sport Performance & Science Reports*, 94, 1-2.
- ⁴⁶ López-Belmonte, Ó., Ruiz-Navarro, J. J., Gay, A., Cuenca-Fernández, F., Cejuela, R., & Arellano, R. (2023). Determinants of 1500-m Front-Crawl Swimming Performance in Triathletes: Influence of Physiological and Biomechanical Variables. *International journal of sports physiology and performance*, 18(11), 1328-1335.
- ⁴⁷ Ambrosini, L., Presta, V., Galli, D., Mirandola, P., Vitale, M., Gobbi, G., & Condello, G. (2022). Interlink Between Physiological and Biomechanical Changes in the Swim-to-Cycle Transition in Triathlon Events: A Narrative Review. *Sports Medicine-Open*, 8(1), 1-12.
- ⁴⁸ Mejías, A. C., & Anta, R. C. (2011). How to get an efficient swim technique in triathlon?. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 287-292.
- ⁴⁹ Pivarnik, J. M., Goetting, M. P., & Senay Jr, L. C. (1986). The effects of body position and exercise on plasma volume dynamics. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 55(4), 450-456.
- ⁵⁰ Kargotich, S., Goodman, C., Keast, D., Morton, A. R. (1998). The influence of exercise-induced plasma volume changes on the interpretation of biochemical parameters used for monitoring exercise, training and sport. *Sports medicine*, 26, 101-117.
- ⁵¹ Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A. V., Bertucci, W. (2011). Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment. *Sports biomechanics*, 10(3), 197-218.
- ⁵² van den Brandt, F. A., Khudair, M., Hettinga, F. J., & Elferink-Gemser, M. T. (2023). Be Aware of the Benefits of Drafting in Sports and Take Your Advantage: A Meta-Analysis. *Translational Sports Medicine*, 2023.
- ⁵³ McCole SD, Claney K, Conte JC, Anderson R, Hagberg JM. Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol*. 1990;68(2):748–53.
- ⁵⁴ Hausswirth, C., Vallier, J. M., Lehénaff, D., Brisswalter, J., Smith, D., Millet, G., Dréano, P. (2001). Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(3), 485-492.

- ⁵⁵ Hausswirth, C., Lehénaff, D., Dréano, P., Savonen, K. (1999). Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 599-604.
- ⁵⁶ Przepisy zawodów
- ⁵⁷ Wu, S. S., Peiffer, J. J., Brisswalter, J., Nosaka, K., Abbiss, C. R. (2014). Factors influencing pacing in triathlon. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 223-234.
- ⁵⁸ Jacobs, R. D., Berg, K. E., Slivka, D. R., Noble, J. M. (2013). The effect of cadence on cycling efficiency and local tissue oxygenation. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3), 637-642.
- ⁵⁹ Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., Vallier, J. M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International journal of sports medicine*, 21(01), 60-64.
- ⁶⁰ Walsh, J. A. (2019). The rise of elite short-course triathlon re-emphasises the necessity to transition efficiently from cycling to running. *Sports*, 7(5), 99.
- ⁶¹ Wu, S. S., Peiffer, J. J., Brisswalter, J., Nosaka, K., & Abbiss, C. R. (2014). Factors influencing pacing in triathlon. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 223-234.
- ⁶² Bernard, T., Hausswirth, C., Le Meur, Y., Bignet, F., Dorel, S., Brisswalter, J. (2009). Distribution of power output during the cycling stage of a triathlon world cup. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(6), 1296-1302.
- ⁶³ Abbiss, C. R., Quod, M. J., Martin, D. T., Netto, K. J., Nosaka, K., Lee, H., Laursen, P. B. (2006). Dynamic pacing strategies during the cycle phase of an Ironman triathlon. *Medicine and science in sports and exercise*, 38(4), 726.
- ⁶⁴ Laursen, P. B., Knez, W. L., Shing, C. M., Langill, R. H., Rhodes, E. C., & Jenkins, D. G. (2005). Relationship between laboratory-measured variables and heart rate during an ultra-endurance triathlon. *Journal of sports sciences*, 23(10), 1111-1120.
- ⁶⁵ Etxebarria, N., Anson, J. M., Pyne, D. B., & Ferguson, R. A. (2014). High-intensity cycle interval training improves cycling and running performance in triathletes. *European journal of sport science*, 14(6), 521-529.
- ⁶⁶ Millet, G. P., Dreano, P., & Bentley, D. J. (2003). Physiological characteristics of elite short-and long-distance triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4), 427-430.

- ⁶⁷ World Triathlon. (2024). *World Triathlon competition rules*. Approved by the World Triathlon Executive Board in February 2024. https://www.triathlon.org/uploads/docs/World-Triathlon_Competition-Rules_2024_20240219.pdf
- ⁶⁸ Hausswirth, C., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Brisswalter, J., Bernard, T. (2010). Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance. *European Journal of Applied Physiology*, *108*, 1115-1123.
- ⁶⁹ Weich, C., Barth, V., Killer, N., Vleck, V., Erich, J., Treiber, T. (2022). Discovering the sluggishness of triathlon running-using the attractor method to quantify the impact of the bike-run transition. *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 1065741.
- ⁷⁰ Walsh, J. A., Stamenkovic, A., Lepers, R., Peoples, G., Stapley, P. J. (2015). Neuromuscular and physiological variables evolve independently when running immediately after cycling. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *25*(6), 887-893.
- ⁷¹ Millet, G. P., Millet, G. Y., Hofmann, M. D., Candau, R. B. (2000). Alterations in running economy and mechanics after maximal cycling in triathletes: influence of performance level. *International journal of sports medicine*, *21*(02), 127-132.
- ⁷² Stewart, J. A., Merritt, E. K., Lidstone, D. E., McBride, J. M., Zwetsloot, K. A. (2022). Prolonged cycling lowers subsequent running mechanical efficiency in collegiate triathletes. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, *14*(1), 1-7.
- ⁷³ Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., Boussana, A., Prefaut, C. (1997). The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *77*(1-2), 98-105
- ⁷⁴ Fraeulin, L., Maurer-Grubinger, C., Holzgreve, F., Groneberg, D. A., & Ohlendorf, D. (2021). Comparison of joint kinematics in transition running and isolated running in elite triathletes in overground conditions. *Sensors*, *21*(14), 4869.
- ⁷⁵ Weich, C., Jensen, R. L., Vieten, M. (2019). Triathlon transition study: Quantifying differences in running movement pattern and precision after bike-run transition. *Sports biomechanics*, *18*(2), 215-228.

- ⁷⁶ Kreider, R. B., Boone, T., Thompson, W. R., Burkes, S., Cortes, C. W. (1988). Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(4), 385-390.
- ⁷⁷ Guezennec, C. Y., Vallier, J. M., Bigard, A. X., Durey, A. (1996). Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 73(5), 440-445
- ⁷⁸ Bonacci, J., Vleck, V., Saunders, P. U., Blanch, P., Vicenzino, B. (2013). Rating of perceived exertion during cycling is associated with subsequent running economy in triathletes. *Journal of science and medicine in sport*, 16(1), 49-53.
- ⁷⁹ Bonacci, J., Saunders, P. U., Alexander, M., Blanch, P., & Vicenzino, B. (2011). Neuromuscular control and running economy is preserved in elite international triathletes after cycling. *Sports biomechanics*, 10(01), 59-71.
- ⁸⁰ Millet, G. P., & Bentley, D. J. (2004). The physiological responses to running after cycling in elite junior and senior triathletes. *International journal of sports medicine*, 25(03), 191-197.
- ⁸¹ Figueiredo, P., Marques, E. A., & Lepers, R. (2016). Changes in contributions of swimming, cycling, and running performances on overall triathlon performance over a 26-year period. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(9), 2406-2415.
- ⁸² Hausswirth, C., Brisswalter, J. (2008). Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. *Sports Medicine*, 38, 881-891.
- ⁸³ O'Toole, M. L., Douglas, P. S. (1995). Applied physiology of triathlon. *Sports Medicine*, 19(4), 251-267
- ⁸⁴ Puccinelli, P. J., Lima, G. H., Pesquero, J. B., de Lira, C. A., Vancini, R. L., Nikolaidis, P. T., Andrade, M. S. (2020). Previous experience, aerobic capacity and body composition are the best predictors for Olympic distance triathlon performance: Predictors in amateur triathlon. *Physiology & behavior*, 225, 113110.
- ⁸⁵ Stöggl, T. L., & Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in physiology*, 6, 295.
- ⁸⁶ Bini, R. R., Jacques, T. C., Hunter, J., & Figueiredo, P. (2022). Biomechanical and physiological implications to running after cycling and strategies to improve

- cycling to running transition: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 25(10), 861-866.
- ⁸⁷ Chapman, A. R., Vicenzino, B., Blanch, P., Dowlan, S., & Hodges, P. W. (2008). Does cycling effect motor coordination of the leg during running in elite triathletes?. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(4), 371-380.
- ⁸⁸ Lundgren, K. M., Karlsen, T., Sandbakk, Ø., James, P. E., & Tjønnå, A. E. (2015). Sport-specific physiological adaptations in highly trained endurance athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(10), 2150-2157.
- ⁸⁹ Borrego-Sánchez, A., Vinolo-Gil, M. J., de-la-Casa-Almeida, M., Rodríguez-Huguet, M., Casuso-Holgado, M. J., & Martín-Valero, R. (2021). Effects of Training on Cardiorespiratory Fitness in Triathletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International journal of environmental research and public health*, 18(24), 13332.
- ⁹⁰ Lorenz, D. S., Reiman, M. P., Lehecka, B., & Naylor, A. (2013). What performance characteristics determine elite versus nonelite athletes in the same sport? *Sports health*, 5 (6), 542-547.
- ⁹¹ Daniels, J. T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Medicine and science in sports and exercise*, 17(3), 332-338.
- ⁹² Jones, A. M., Koppo, K., & Burnley, M. (2003). Effects of prior exercise on metabolic and gas exchange responses to exercise. *Sports Medicine*, 33, 949-971.
- ⁹³ Foster, C., Lucia, A. (2007). Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports medicine*, 37, 316-319.
- ⁹⁴ Fletcher, J. R., Esau, S. P., & MacIntosh, B. R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology*, 107(6), 1918-1922.
- ⁹⁵ Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports medicine*, 29, 373-386.
- ⁹⁶ Bransford, D. R., & Howley, E. T. (1977). Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Medicine and science in sports*, 9(1), 41-44.
- ⁹⁷ Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports medicine-open*, 1(1), 1-15.

- ⁹⁸ THOMAS, D. Q., Fernhall, B. O., & GRANAT, H. (1999). Changes in running economy during a 5-km run in trained men and women runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(2), 162-167.
- ⁹⁹ Fletcher, J. R., Pfister, T. R., & MacIntosh, B. R. (2013). Energy cost of running and Achilles tendon stiffness in man and woman trained runners. *Physiological reports*, 1(7), e00178.
- ¹⁰⁰ Pialoux, V., Proust, O., & Mounier, R. (2008). Energy expenditure of submaximal running does not increase after cycle-run transition. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 48(2), 143.
- ¹⁰¹ Saltin, B., Larsen, H., Terrados, N., Bangsbo, J., Bak, T., Kim, C. K., & Rolf, C. J. (1995). Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 5(4), 209-221.
- ¹⁰² Lucia, A., Oliván, J., Bravo, J., Gonzalez-Freire, M., & Foster, C. (2008). The key to top-level endurance running performance: a unique example. *British Journal of Sports Medicine*, 42(3), 172-174.
- ¹⁰³ Ahmetov, I. I., Fedotovskaya, O. N. (2015). Current progress in sports genomics. *Advances in clinical chemistry*, 70, 247-314.
- ¹⁰⁴ Rodas, G., Calvo, M., Estruch, A., Garrido, E., Ercilla, G., Arcas, A., & Ventura, J. L. (1998). Heritability of running economy: a study made on twin brothers. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 77, 511-516.
- ¹⁰⁵ He, Z., Hu, Y., Feng, L., Lu, Y., Liu, G., Xi, Y., McNaughton, L. R. (2007). NRF2 genotype improves endurance capacity in response to training. *International journal of sports medicine*, 717-721.
- ¹⁰⁶ Bonacci, J., Chapman, A., Blanch, P., & Vicenzino, B. (2009). Neuromuscular adaptations to training, injury and passive interventions: implications for running economy. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(11), 903-921. <https://doi.org/10.2165/11317850-000000000-00000>
- ¹⁰⁷ Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Strategies to improve running economy. *Sports medicine*, 45, 37-56.

- ¹⁰⁸ Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *European journal of applied physiology*, 89, 1-7.
- ¹⁰⁹ Eihara, Y., Takao, K., Sugiyama, T., Maeo, S., Terada, M., Kanehisa, H., & Isaka, T. (2022). Heavy resistance training versus plyometric training for improving running economy and running time trial performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine-Open*, 8(1), 138.
- ¹¹⁰ Wei, C., Yu, L., Duncan, B., & Renfree, A. (2020). A plyometric warm-up protocol improves running economy in recreational endurance athletes. *Frontiers in physiology*, 11, 509368.
- ¹¹¹ Barnes, K. R., Hopkins, W. G., Mcguigan, M. R., Northuis, M. E., & Kilding, A. E. (2013). Effects of resistance training on running economy and cross-country performance.
- ¹¹² Blagrove, R. C., Howatson, G., & Hayes, P. R. (2018). Effects of strength training on the physiological determinants of middle-and long-distance running performance: a systematic review. *Sports Medicine*, 48, 1117-1149.
- ¹¹³ Roschel, H., Barroso, R., Tricoli, V., Batista, M. A., Acquesta, F. M., Serrão, J. C., & Ugrinowitsch, C. (2015). Effects of strength training associated with whole-body vibration training on running economy and vertical stiffness. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(8), 2215-2220.
- ¹¹⁴ Cheng, C. F., Cheng, K. H., Lee, Y. M., Huang, H. W., Kuo, Y. H., & Lee, H. J. (2012). Improvement in running economy after 8 weeks of whole-body vibration training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(12), 3349-3357.
- ¹¹⁵ Barnes, K. R., Hopkins, W. G., McGuigan, M. R., & Kilding, A. E. (2013). Effects of different uphill interval-training programs on running economy and performance. *International journal of sports physiology and performance*, 8(6), 639-647.
- ¹¹⁶ Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Cunningham, R. B., Gore, C. J., Hahn, A. G., & Hawley, J. A. (2004). Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *Journal of Applied Physiology*, 96(3), 931-937.

- ¹¹⁷ Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Hahn, A. G., & Gore, C. J. (2009). Improved running economy and increased hemoglobin mass in elite runners after extended moderate altitude exposure. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 67-72.
- ¹¹⁸ Jones, A. M. (2006). The physiology of the world record holder for the women's marathon. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 1(2), 101-116.
- ¹¹⁹ Takahashi, K., & Usui, S. (2016, November). Running economy and Mechanics in triathletes vs. runners. *In ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- ¹²⁰ Swinnen, W., Kipp, S., & Kram, R. (2018). Comparison of running and cycling economy in runners, cyclists, and triathletes. *European journal of applied physiology*, 118, 1331-1338.
- ¹²¹ Lepers, R. (2020). *The Master Triathlete*. In: Migliorini, S. (eds) *Triathlon Medicine*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22357-1_14
- ¹²² Giovanelli, Nicola, et al. "Effects of strength, explosive and plyometric training on energy cost of running in ultra-endurance athletes". *European Journal of Sport Science* 17.7 (2017): 805-813
- ¹²³ Bober T., Rutkowska-Kucharska A., Pietraszewski B., Ćwiczenia plyometryczne – charakterystyka biomechaniczna, wskaźniki, zastosowania, *Sport Wyczynowy*, 2007, 7–9, 5–25.
- ¹²⁴ Davies, G., Riemann, B. L., Manske, R. (2015). Current concepts of plyometric exercise. *International journal of sports physical therapy*, 10(6), 760.
- ¹²⁵ Potach D. H. (2004). "Plyometric and speed training", in *NSCA's essent pers train*. Editors R. W. Earle, and T. R. Baechle (Champaign Illinois: Human Kinetics), 425–458.
- ¹²⁶ Bobbert, M.F., K.G.M. Gerritsen, M.C.A Litjens, and A.J. Van Soest. 1996. Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28: 1402-1412.
- ¹²⁷ Wilson, J. M., & Flanagan, E. P. (2008). The role of elastic energy in activities with high force and power requirements: a brief review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(5), 1705-1715.

- ¹²⁸ Cavanagh PR, Komi PV. Electro-mechanical delay in human skeletal-muscle under concentric and eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1979;42(3):159-163.
- ¹²⁹ Chmielewski, T. L., Myer, G. D., Kauffman, D., & Tillman, S. M. (2006). Plyometric exercise in the rehabilitation of athletes: physiological responses and clinical application. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 36(5), 308-319.
- ¹³⁰ Chimera, N. J., Swanik, K. A., Swanik, C. B., & Straub, S. J. (2004). Effects of plyometric training on muscle-activation strategies and performance in female athletes. *Journal of athletic training*, 39(1), 24.
- ¹³¹ Davies, G. J., & Matheson, J. W. (2001). Shoulder plyometrics. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*, 9(1), 1-18.
- ¹³² Booth, M. A., & Orr, R. (2016). Effects of plyometric training on sports performance. *Strength & Conditioning Journal*, 38(1), 30-37.
- ¹³³ Clark, M., Lucett, S., & Kirkendall, D. T. (2016). Plyometric training concepts for performance enhancement training concepts. *Natl. Acad. Sport Med*, 24, 207-226.
- ¹³⁴ Markovic, G., & Mikulic, P. (2010). Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. *Sports medicine*, 40, 859-895.
- ¹³⁵ Burton, R. F. (2007). Why is the body mass index calculated as mass/height², not as mass/height³? *Annals of Human Biology*, 34(6), 656–663.
- ¹³⁶ Duncan, G. E., Howley, E. T., Johnson, B. N. (1997). Applicability of VO₂max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(2), 273-278.
- ¹³⁷ Bhambhani, Y., Singh, M. (1985). Ventilatory thresholds during a graded exercise test. *Respiration*, 47(2), 120-128.
- ¹³⁸ Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human kinetics.
- ¹³⁹ O'Connor, H., & Slater, G. (2011). Losing, gaining and making weight for athletes. *Sport and exercise nutrition*, 210-232.
- ¹⁴⁰ Heydenreich, J., Kayser, B., Schutz, Y., & Melzer, K. (2017). Total energy expenditure, energy intake, and body composition in endurance athletes across the training season: a systematic review. *Sports medicine-open*, 3, 1-24.

- ¹⁴¹ Berryman, N., Mujika, I., Arvisais, D., Roubéix, M., Binet, C., & Bosquet, L. (2018). Strength training for middle-and long-distance performance: a meta-analysis. *International journal of sports physiology and performance*, *13*(1), 57-64.
- ¹⁴² Ramirez-Campillo, R., García-Pinillos, F., Nikolaidis, P. T., Clemente, F., Gentil, P., & García-Hermoso, A. (2022). Body composition adaptations to lower-body plyometric training: a systematic review and meta-analysis. *Biology of sport*, *39*(2), 273-287.
- ¹⁴³ Grgic, J., Schoenfeld, B. J., & Mikulic, P. (2021). Effects of plyometric vs. resistance training on skeletal muscle hypertrophy: A review. *Journal of sport and health science*, *10*(5), 530-536.
- ¹⁴⁴ González-Parra, G., Mora, R., & Hoeger, B. (2013). Maximal oxygen consumption in national elite triathletes that train in high altitude. *Journal of Human Sport and Exercise*, *8*(2), 342–349.
- ¹⁴⁵ Landers, G. J., Blanksby, B. A., Ackland, T. R., & Smith, D. (2000). Morphology and performance of world championship triathletes. *Annals of human biology*, *27*(4), 387-400.
- ¹⁴⁶ Gianoli, D., Knechtle, B., Knechtle, P., Barandun, U., Rüst, C. A., & Rosemann, T. (2012). Comparison between recreational male Ironman triathletes and marathon runners. *Perceptual and motor skills*, *115*(1), 283-299.
- ¹⁴⁷ Knechtle, B., Knechtle, P., & Rosemann, T. (2011). Upper body skinfold thickness is related to race performance in male Ironman triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, *32*(01), 20-27.
- ¹⁴⁸ Rüst, C. A., Knechtle, B., Knechtle, P., Wirth, A., & Rosemann, T. (2012). A comparison of anthropometric and training characteristics among recreational male Ironman triathletes and ultra-endurance cyclists. *Chin J Physiol*, *55*(2), 114-24.
- ¹⁴⁹ O'Toole, M. L., Hiller, D. B., Crosby, L. O., & Douglas, P. S. (1987). The ultraendurance triathlete: a physiological profile. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *19*(1), 45-50.
- ¹⁵⁰ Arslan, E., & Aras, D. (2016). Comparison of body composition, heart rate variability, aerobic and anaerobic performance between competitive cyclists and triathletes. *Journal of Physical Therapy Science*, *28*(4), 1325-1329.

- ¹⁵¹ Firmansyah, A., Preasetya, M. R. A., Al Ardha, M. A., Ayubi, N., Putro, A. B., Mutohir, T. C., ... & Hanief, Y. N. (2024). The Football Players on Plyometric Exercise: A Systematic Review. *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, (51), 442-448.
- ¹⁵² Dæhlin, T. E., Haugen, O. C., Haugerud, S., Hollan, I., Raastad, T., & Rønnestad, B. R. (2017). Improvement of ice hockey players' on-ice sprint with combined plyometric and strength training. *International journal of sports physiology and performance*, 12(7), 893-900.
- ¹⁵³ Singh, J., Appleby, B. B., & Lavender, A. P. (2018). Effect of plyometric training on speed and change of direction ability in elite field hockey players. *Sports*, 6(4), 144.
- ¹⁵⁴ Aksović, N., Bjelica, B., Milanović, F., Jovanović, N., & Zelenović, M. (2021). Plyometric training effects on explosive power, sprint and direction change speed in basketball: A review. *Turkish Journal of Kinesiology*, 7(2), 73-79.
- ¹⁵⁵ Ramirez-Campillo, R., García-Hermoso, A., Moran, J., Chaabene, H., Negra, Y., & Scanlan, A. T. (2022). The effects of plyometric jump training on physical fitness attributes in basketball players: A meta-analysis. *Journal of sport and health science*, 11(6), 656-670.
- ¹⁵⁶ De Villarreal, E. S. S., Requena, B., & Newton, R. U. (2010). Does plyometric training improve strength performance? A meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*, 13(5), 513-522.
- ¹⁵⁷ de Villarreal, E. S., Requena, B., & Cronin, J. B. (2012). The effects of plyometric training on sprint performance: a meta-analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(2), 575-584
- ¹⁵⁸ Kons, R. L., Orssatto, L. B., Ache-Dias, J., De Pauw, K., Meeusen, R., Trajano, G. S., Detanico, D. (2023). Effects of plyometric training on physical performance: An umbrella review. *Sports medicine-open*, 9(1), 4.
- ¹⁵⁹ Suriano, R., & Bishop, D. (2010). Physiological attributes of triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(3), 340-347.
- ¹⁶⁰ Rothschild, J., & Crocker, G. H. (2019). Effects of a 2-km swim on markers of cycling performance in elite age-group triathletes. *Sports*, 7(4), 82.

- ¹⁶¹ Cejuela, R., Selles-Perez, S. (2023). Training characteristics and performance of two male elite short-distance triathletes: From junior to “world-class”. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 33(12), 2444-2456.
- ¹⁶² Wibisono, H. (2020, November). Effect of Plyometric and Sprint Training on VO2Max in Amateur Football Player. In *International Conference of Health Development. Covid-19 and the Role of Healthcare Workers in the Industrial Era (ICHHD 2020)* (pp. 129-131). Atlantis Press.
- ¹⁶³ Ramírez-Campillo, R., Vergara-Pedrerros, M., Henríquez-Olguín, C., Martínez-Salazar, C., Alvarez, C., Nakamura, F. Y., ... & Izquierdo, M. (2016). Effects of plyometric training on maximal-intensity exercise and endurance in male and female soccer players. *Journal of sports sciences*, 34(8), 687-693.
- ¹⁶⁴ Ghosh, A. K. (2004). Anaerobic threshold: its concept and role in endurance sport. *The Malaysian journal of medical sciences: MJMS*, 11(1), 24.
- ¹⁶⁵ Müller W, Horn M, Fürhapter-Rieger A, Kainz P, Kröpfl JM, Maughan RJ, Ahammer H. Body composition in sport: A comparison of a novel ultrasound imaging technique to measure subcutaneous fat tissue compared with skinfold measurement. *Br J Sports Med* 2013. In press. doi: 10.1136/bjsports-2013-092232.
- ¹⁶⁶ Meyer, T., Faude, O., Scharhag, J., Urhausen, A., & Kindermann, W. (2004). Is lactic acidosis a cause of exercise induced hyperventilation at the respiratory compensation point?. *British journal of sports medicine*, 38(5), 622-625.
- ¹⁶⁷ Sandoo, A. (2021). A brief history of the anaerobic threshold concept. *ACSM's Health & Fitness Journal*, 25(3), 7-10.
- ¹⁶⁸ Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., & Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11(4), 338-44.
- ¹⁶⁹ Filipas, L., Bonato, M., Maggio, A., Gallo, G., & Codella, R. (2023). Effects of plyometric training on different 8-week training intensity distributions in well-trained endurance runners. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 33(3), 200-212.
- ¹⁷⁰ Ramírez-Campillo, R., Alvarez, C., Henríquez-Olguín, C., Baez, E. B., Martínez, C., Andrade, D. C., & Izquierdo, M. (2014). Effects of plyometric training on

- endurance and explosive strength performance in competitive middle-and long-distance runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(1), 97-104.
- ¹⁷¹ Egan-Shuttler, J. D., Edmonds, R., Eddy, C., O'Neill, V., & Ives, S. J. (2017). The effect of concurrent plyometric training versus submaximal aerobic cycling on rowing economy, peak power, and performance in male high school rowers. *Sports medicine-open*, 3, 1-10.
- ¹⁷² Gerstner, L. (2007). *The effect of plyometric training on the performance of cyclists* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- ¹⁷³ Sarkar, S., Dasgupta, S., Meitei, K. K., Adhikari, S., Bandyopadhyay, A., & Dey, S. K. (2020). Effect of eccentric cycling and plyometric training on physiological and performance related parameters of trained junior track cyclists. *Polish Journal of Sport and Tourism*, 27(1), 14-20.
- ¹⁷⁴ Ramírez-delaCruz, M., Bravo-Sánchez, A., Esteban-García, P., Jiménez, F., & Abián-Vicén, J. (2022). Effects of plyometric training on lower body muscle architecture, tendon structure, stiffness and physical performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports medicine-open*, 8(1), 40.
- ¹⁷⁵ Hunter, G. R., McCarthy, J. P., Carter, S. J., Bamman, M. M., Gaddy, E. S., Fisher, G., ... & Newcomer, B. R. (2015). Muscle fiber type, Achilles tendon length, potentiation, and running economy. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(5), 1302-1309.
- ¹⁷⁶ Bonacci, J., Green, D., Saunders, P. U., Franettovich, M., Blanch, P., & Vicenzino, B. (2011). Plyometric training as an intervention to correct altered neuromotor control during running after cycling in triathletes: a preliminary randomised controlled trial. *Physical Therapy in Sport*, 12(1), 15-21.
- ¹⁷⁷ Heiden, T., & Burnett, A. (2003). Triathlon: The effect of cycling on muscle activation in the running leg of an Olympic distance triathlon. *Sports Biomechanics*, 2(1), 35-49.
- ¹⁷⁸ Le Meur, Y., Thierry, B., Rabita, G., Dorel, S., Honnorat, G., Brisswalter, J., & Hausswirth, C. (2013). Spring-mass behaviour during the run of an international triathlon competition. *International journal of sports medicine*, 34(08), 748-755.

- ¹⁷⁹ Cala, A., Veiga, S., García, A., & Navarro, E. (2009). Previous cycling does not affect running efficiency during a triathlon World Cup competition. *J Sports Med Phys Fitness*, *49*(2), 152-8.
- ¹⁸⁰ Ofoghi, B., Zeleznikow, J., Macmahon, C., Rehula, J., & Dwyer, D. B. (2016). Performance analysis and prediction in triathlon. *Journal of sports sciences*, *34*(7), 607-612.
- ¹⁸¹ Di Giminiani, R., Giovannelli, A., Capuano, L., Izzicupo, P., Di Blasio, A., & Masedu, F. (2020). Neuromuscular strategies in stretch–shortening exercises with increasing drop heights: the role of muscle coactivation in leg stiffness and power propulsion. *International journal of environmental research and public health*, *17*(22), 8647.
- ¹⁸² Paavolainen, L., Häkkinen, K., Härmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of applied physiology*.
- ¹⁸³ Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Peltola, E. M., Cunningham, R. B., Gore, C. J., & Hawley, J. A. (2006). Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *20*(4), 947-954.
- ¹⁸⁴ Llanos-Lagos, C., Ramirez-Campillo, R., Moran, J., & Sáez de Villarreal, E. (2024). Effect of Strength Training Programs in Middle-and Long-Distance Runners' Economy at Different Running Speeds: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine*, 1-38.
- ¹⁸⁵ Beattie, K., Carson, B. P., Lyons, M., Rossiter, A., & Kenny, I. C. (2017). The effect of strength training on performance indicators in distance runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *31*(1), 9-23.
- ¹⁸⁶ Sunde, A., Støren, Ø., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., & Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *24*(8), 2157-2165.
- ¹⁸⁷ Blagrove, R. C., Howatson, G., & Hayes, P. R. (2018). Effects of strength training on the physiological determinants of middle-and long-distance running performance: a systematic review. *Sports Medicine*, *48*, 1117-1149.

- ¹⁸⁸ Issurin, V. B., Lyakh, V. I., & Sadowski, J. (2020). Strength training of endurance athletes: interference or additive effects. A review. *Acta Kinesiologica*, *14*(1), 16-21.
- ¹⁸⁹ Luckin, K. M., Badenhorst, C. E., Cripps, A. J., Landers, G. J., Merrells, R. J., Bulsara, M. K., & Hoyne, G. F. (2021). Strength training in long-distance triathletes: Barriers and characteristics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *35*(2), 495-502.
- ¹⁹⁰ Luckin-Baldwin, K. M., Badenhorst, C. E., Cripps, A. J., Landers, G. J., Merrells, R. J., Bulsara, M. K., & Hoyne, G. F. (2021). Strength training improves exercise economy in triathletes during a simulated triathlon. *International journal of sports physiology and performance*, *16*(5), 663-673.
- ¹⁹¹ Skinner, J. S., & McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research quarterly for exercise and sport*, *51*(1), 234-248.
- ¹⁹² Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in physiology*,
- ¹⁹³ Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S., & Lucia, A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *21*(3), 943-949.
- ¹⁹⁴ Muñoz, I., Cejuela, R., Seiler, S., Larumbe, E., & Esteve-Lanao, J. (2014). Training-intensity distribution during an ironman season: relationship with competition performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *9*(2), 332-339.
- ¹⁹⁵ Treff, G., Winkert, K., Sareban, M., Steinacker, J. M., & Sperlich, B. (2019). The polarization-index: a simple calculation to distinguish polarized from non-polarized training intensity distributions. *Frontiers in physiology*, *10*, 707.
- ¹⁹⁶ Selles-Perez, S., Fernández-Sáez, J., & Cejuela, R. (2019). Polarized and pyramidal training intensity distribution: Relationship with a half-ironman distance triathlon competition. *Journal of Sports Science & Medicine*, *18*(4), 708.
- ¹⁹⁷ Maffetone, P. B., & Laursen, P. B. (2016). Athletes: fit but unhealthy?. *Sports medicine-open*, *2*, 1-4.

¹⁹⁸ Pöller, S. (2015, July). Success factors in the 2014 triathlon mixed relay world championships. In *20th annual congress of the European College of Sports Science (ePoster)*.

Streszczenie

Wpływ treningu plyometrycznego na ekonomię biegu triathlonistów po intensywnej jeździe na rowerze

Wstęp

Triathloniści mają wysokie wartości maksymalnego poboru tlenu (VO₂ max). Chociaż VO₂ max jest predyktorem osiągnięć u triathlonistów również istotny jest próg beztlenowy i ekonomia ruchu. Wynik w zawodach triathlonowych zależy od umiejętności przejścia między dyscyplinami, w szczególności między jazdą na rowerze a bieganiem. Badania wskazują, że na ostateczną pozycję w czasie wyścigu triathlonowego największe znaczenie ma odcinek biegowy. Badania wskazują, że uprzednia aktywność rowerowa wywiera wpływ na efektywność biegu i wiąże się z obserwowanymi zmianami w parametrach nerwowo-mięśniowych, fizjologicznych i biomechanicznych. Triathloniści na różnych poziomach umiejętności często doświadczają subiektywnego odczucia braku koordynacji podczas biegu po zakończeniu etapu rowerowego. Dlatego też określenie interwencji treningowych, które mogłyby zminimalizować te zakłócenia, mogą pomóc w poprawie wydolności podczas biegania po jeździe na rowerze. Trening plyometryczny to specyficzna forma treningu siłowego. Ćwiczenia podczas takiego treningu opierają się na pracy mięśnia w cyklu rozciągnięcie-skurcz, jego celem jest zwiększenie zdolności mięśnia do szybkiego wyzwolania siły w jak najkrótszym czasie. Liczne badania pokazują, że kombinacja treningu wytrzymałościowego z plyometrycznym przynosi pozytywne rezultaty w poprawie ekonomii biegu u osób trenujących biegi wytrzymałościowe.

Celem pracy była ocena wpływu 8-tygodniowego treningu plyometrycznego na ekonomię biegu po intensywnej jeździe na rowerze u triathlonistów. Praca miała również na celu ocenę wpływu treningu o charakterze plyometrycznym na zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych na wysiłek o charakterze progowym (VT₂) i maksymalnym (max) zarówno podczas biegu jak i jazdy na rowerze.

Metody badawcze

Badania miały charakter eksperymentalny i zostały przeprowadzone z udziałem zawodników trenujących triathlon na poziomie lokalnym (n=19). W pierwszej części wszyscy zawodnicy wykonali pomiary somatyczne oraz test stopniowany dla biegu i kolarstwa. W kolejnych testach została oceniona ekonomia biegu oraz ekonomia biegu po intensywnej jeździe na rowerze wraz z oznaczeniami biochemicznymi. Wszystkie testy były wykonane w odpowiednich odstępach czasowych. W drugiej części badań zawodnicy zostali podzieleni losowo (randomizacja) dwie grupy: kontrolną (n=9) i eksperymentalną (n=10). Zawodnicy przydzieleni do grupy eksperymentalnej włączyli do swojego planu treningowego, przez okres 8 tygodni (2x w tygodniu) trening plyometryczny. Grupa kontrolna trenowała jak dotychczas. Po 8 tygodniach zawodnicy ponownie wykonali pomiary somatyczne, testy stopniowane dla biegu i kolarstwa, ocenę ekonomii biegu oraz ekonomii biegu po intensywnej jeździe na rowerze wraz z oznaczeniami biochemicznymi jak w części pierwszej.

Wyniki

Nie zaobserwowano istotnych zmian pod wpływem treningu plyometrycznego we wskaźnikach fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas jazdy na rowerze HR max (p=0,53), VO₂ max (p=0,97), VO₂/kg max (p=0,92), VE max (p=0,93), P max (p=0,19), P max/kg (p=0,23) oraz biegu HR max (p=0,09), VO₂ max (p=0,67), VO₂/kg max (p=0,41), VE max (p=0,94).

W grupie eksperymentalnej po 8 tygodniach treningu plyometrycznego zaobserwowano istotne wydłużenie czasu osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego podczas biegu (p=0,014) oraz wyższą prędkość biegu przy drugim progu wentylacyjnym (p=0,013).

Trening plyometryczny nie wpłynął istotnie na zmiany w ekonomii biegu u badanych triathlonistów przy żadnej z testowanych prędkości (bieg II p=0,10; bieg III p=0,51) oraz nie wpłynął istotnie na ekonomię biegu po jeździe na rowerze (bieg II p=0,09; bieg III p=0,61)

Nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic w badanych wskaźnikach somatycznych zarówno w grupie eksperymentalnej jak i kontrolnej.

Wnioski

Trening plyometryczny nie wpływa na ekonomię biegu oraz ekonomię biegu po jeździe na rowerze u triathlonistów. Trening plyometryczny nie wpłynął na zmiany wskaźnika VO_2 max podczas jazdy na rowerze i biegu, może jednak mieć wpływ na poprawę prędkości biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego (VT2). Czas osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego (VT2) podczas biegu w grupie eksperymentalnej wydłużył się o 9,8% po treningu plyometrycznym, a prędkość biegu przy drugim progu wentylacyjnym (VT2) w grupie eksperymentalnej wzrosła o 4,3%. Jazda na rowerze wpływa istotnie na wzrost częstości skurczów serca, wentylacji minutowej płuc, stężenia mleczanu we krwi oraz subiektywnego odczucia wysiłku podczas biegu.

Trening plyometryczny warto uwzględnić jako element uzupełniający przygotowania triathlonistów do sezonu, ponieważ może zwiększyć tolerancję do rozwijającej się kwasicy metabolicznej podczas biegu.

Wskazane jest zwiększenie ilości badań nad wpływem treningu siłowego, szczególnie wśród sportowców na poziomie krajowym i międzynarodowym, gdzie brakuje dotychczas szczegółowych analiz.

Summary

The effect of plyometric training on triathlete's running economy after intense cycling

Introduction

Triathletes have high maximal oxygen uptake (VO₂ max) values. Although VO₂ max is a predictor of performance in triathletes, the anaerobic threshold and movement economy are also crucial factors. Triathlon competitions success depends on the ability to transition between disciplines, especially between cycling and running. Previous studies suggest that the running segment has the greatest influence on the final position in a triathlon race. Research indicates that prior cycling activity affects running efficiency and is associated with observed changes in neuromuscular, physiological, and biomechanical parameters. Triathletes at various skill levels often experience a subjective feeling of lack of coordination during the run after completing the cycling phase. Therefore, identifying training interventions that could minimize these disturbances may help improve after cycling running performance.

Plyometric training is a specific form of strength training. The plyometric exercises are based on the stretch-shortening muscle cycle, aiming to increase the muscle's ability to quickly generate force in the shortest time possible. Numerous studies shows that endurance training and plyometric training combination brings positive results by improving running economy in endurance athletes.

The aim of the study was to evaluate the effect of an 8-week plyometric training program on running economy after intense cycling in triathletes. Also, the study aimed to assess the impact of plyometric training on selected physiological indicators at the threshold (VT₂) and maximal effort during both running and cycling.

Research methods

The experimental study involved local level competition triathletes (n=19). Firstly, all athletes underwent body composition measurements and graded exercise tests for running and cycling. Secondly, the running economy, running economy after intense cycling and biochemical markers were assessed. All tests were performed at appropriate time intervals.

Next, the athletes were randomly assigned to two groups: a control group (n=9) and an experimental group (n=10). The experimental group included plyometric training in their training plan for 8 weeks (twice per week). The control group trained as usual. After 8 weeks, all athletes repeated the body composition measurements, graded exercise tests for both running and cycling, as well as assessments of running economy and running economy after intense cycling, along with biochemical marker evaluations, just as at the start of the study.

Results

No significant changes were observed under the influence of plyometric training in physiological indicators characterizing maximal effort during cycling included HR max (p=0.53), VO₂ max (p=0.97), VO₂/kg max (p=0.92), VE max (p=0.93), P max (p=0.19), and P max/kg (p=0.23), and during running HR max (p=0.09), VO₂ max (p=0.67), VO₂/kg max (p=0.41), and VE max (p=0.94).

In the experimental group, after 8 weeks of plyometric training, a significant increase in the time to reach the second ventilatory threshold during running was observed (p=0.014) and higher running speed at the second ventilatory threshold (p=0.013).

Plyometric training did not significantly affect changes in running economy at any of the tested speeds in the studied triathletes (speed II: p=0.10; speed III: p=0.51), and did not significantly influence running economy after cycling (speed II: p=0.09; speed III: p=0.61).

No statistically significant differences were observed in the somatic indicators examined in either the experimental or control group.

Conclusion

Plyometric training does not affect running economy or running economy after cycling in triathletes. Plyometric training did not lead to changes in VO₂ max during cycling and running. However, it may improve running speed at the second ventilatory threshold (VT₂). The time to reach the second ventilatory threshold (VT₂) during running in the experimental group increased by 9.8% after plyometric training, while the running speed at VT₂ in the experimental group increased by 4.3%. Cycling significantly influences the increase in heart rate, pulmonary ventilation, blood lactate concentration, and subjective perception of effort during running.

Plyometric training should be considered as complementary element in triathletes' preparation for the season, as it may increase tolerance to developing metabolic acidosis during running.

Further research on the effects of strength training is recommended, particularly among national and international level athletes, where detailed analyses are still lacking.

Wykaz tabel

Tabela 1.	Plan autorskiego treningu	40
Tabela 2.	Wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym wybranych wskaźników somatycznych u badanych triathlonistów, przed rozpoczęciem 8 tygodniowego treningu i po nim, z podziałem na grupy eksperymentalną i kontrolną	43
Tabela 3.	Wyniki analizy statystycznej wartości wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego VT2 podczas biegowego testu stopniowanego przed i po interwencji treningowej.....	45
Tabela 4.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas biegowego testu stopniowanego	47
Tabela 5.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących poziom drugiego progu wentylacyjnego (VT2) podczas rowerowego testu stopniowanego	48
Tabela 6.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych charakteryzujących maksymalny poziom wysiłkowy podczas testu stopniowanego na ergometrze rowerowym.	50
Tabela 7.	Wpływ jazdy na rowerze na zmianę ekonomii biegu z prędkością odpowiadającą drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2 (n=19)	51
Tabela 8.	Wpływ jazdy na rowerze na zmianę ekonomii biegu z prędkością startową (n=19).....	52
Tabela 9.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej VT2.....	53
Tabela 10.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu w tempie startowym	54
Tabela 11.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego po jeździe na rowerze.	56
Tabela 12.	Zmiany wybranych wskaźników fizjologicznych po zastosowaniu treningu plyometrycznego podczas wysiłku na bieżni mechanicznej podczas biegu w tempie startowym po jeździe na rowerze	57
Tabela 13.	Sumaryczny czas trwania obciążenia treningowego w trzech strefach intensywności z podziałem na dyscypliny sportowe w grupie eksperymentalnej i kontrolnej w trakcie 8 tygodni: [hh:mm: ss].....	58
Tabela 14.	Porównanie czasu trwania treningu w trzech analizowanych strefach w czasie 8-tygodniowego monitorowania intensywności treningu w 3 konkurencjach pomiędzy grupą eksperymentalną a kontrolną.	58

Wykaz rycin

Rycina 1.	Schemat organizacyjny badania.....	30
Rycina 2.	Schemat oceny ekonomii biegu	36
Rycina 3.	Schemat oceny ekonomii biegu po jeździe na rowerze	37
Rycina 4.	Schemat pobrań krwi do oznaczeń biochemicznych	38
Rycina 5.	Zmiany w czasie osiągnięcia drugiego progu wentylacyjnego w grupach przed i po treningu.....	45
Rycina 6.	Zmiany w częstości skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego w grupach przed i po treningu	46
Rycina 7.	Prędkości biegu przy drugim progu wentylacyjnym w grupach przed i po interwencji treningowej.....	46
Rycina 8.	Minutowy globalny pobór tlenu na poziomie drugiego progu wentylacyjnego podczas jazdy na rowerze w grupach przed i po interwencji treningowej.....	49
Rycina 9.	Częstość skurczów serca na poziomie drugiego progu wentylacyjnego podczas jazdy na rowerze w grupach przed i po interwencji treningowej	49
Rycina 10.	Powysiłkowy poziom stężenia mleczanu podczas biegu na poziomie progowym w grupach przed i po interwencji treningowej.....	54

Aneks

Nie wszystkie wyniki stężenia mleczanu zostały szczegółowo omówione w analizie, dlatego dołączono tabelę zawierającą pełne wyniki pomiarów stężenia mleczanu przed i po treningu plyometrycznym we wszystkich punktach czasowych.

Tabela 15. Wyniki pomiarów stężenia mleczanu przed i po treningu plyometrycznym we wszystkich punktach czasowych

Punkt pomiarowy	Grupa	Przed	Po
T1	E	2,12 ± 0,64	2,02 ± 0,68
	K	2,65 ± 0,64	3,90 ± 3,46
T2	E	2,59 ± 0,99	2,26 ± 0,92
	K	3,14 ± 0,92	3,73 ± 1,70
T3	E	4,55 ± 1,09	3,50 ± 1,64
	K	4,67 ± 1,29	3,96 ± 0,79
T4	E	1,87 ± 0,58	1,70 ± 0,24
	K	2,44 ± 0,61	3,38 ± 1,73
T5	E	3,18 ± 1,34	3,32 ± 1,85
	K	3,75 ± 1,29	5,26 ± 2,46
T6	E	4,30 ± 1,67	4,22 ± 1,73
	K	4,51 ± 1,87	5,41 ± 2,46
T7	E	5,62 ± 2,36	4,71 ± 1,84
	K	5,76 ± 0,99	7,37 ± 4,94

Wyniki zaprezentowane w postaci średnia ± odchylenie standardowe, Grupa E – grupa eksperymentalna, Grupa K – grupa kontrolna, przed-pomiar przed interwencją treningową, po-pomiar po interwencji treningowej.

- T1- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości 10 km·h⁻¹,
- T2- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2,
- T3- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej tempu startowemu na 10 km,
- T4- po upływie 180 minut od ostatniego wysiłku na bieżni mechanicznej, przed rozpoczęciem jazdy na ergometrze rowerowym,
- T5- w 3 minucie po zakończeniu 70-minutowej jazdy na ergometrze rowerowym,

- T6- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej drugiemu progowi wentylacyjnemu VT2,
- T7- w 3 minucie odpoczynku po zakończeniu 6-minutowego wysiłku na bieżni mechanicznej przy prędkości odpowiadającej tempu startowemu na 10.